

REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO ANTIGO

JOÃO MIRANDA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor João Miranda Guedes

JULHO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Á minha família e amigos,

*Nunca serás capaz de atravessar o Oceano se não tiveres coragem para te
afastares da costa*

Cristovão Colombo

AGRADECIMENTOS

Agradecimento muito especial ao meu orientador – Professor Doutor João Miranda Guedes e ao Tiago Ilharco por toda a ajuda disponibilizada.

RESUMO

Este trabalho tem por objectivo estruturar uma metodologia de diagnóstico e intervenção estrutural num edifício antigo (rés-do-chão + 1), construído há cerca de dois séculos atrás no Norte de Portugal, assim como criar condições para efectuar intervenções semelhantes em edifícios que foram construídos com tecnologias similares, utilizando as metodologias identificadas neste documento

Dar-se-á especial destaque a anomalias que afectam sistemas estruturais em madeira assim como às diferentes técnicas de reforço e reabilitação disponíveis para este tipo de estruturas.

A estratégia de base que presidiu à elaboração deste trabalho incluiu uma fase de inspecção de diagnóstico em que foram identificados todos os problemas de que a estrutura padecia, passando-se de seguida ao estudo de estratégias de intervenção e definição de soluções mais adequadas para intervir num edifício que foi construído com sistemas de construção típicos e muito em voga no início do século XX, essencialmente no Norte de Portugal.

Palavras-Chave: Reabilitação Estrutural, Estruturas de Madeira, Reforço Estrutural, Construção em Madeira

ABSTRACT

The goal of this thesis is to streamline a series of techniques and methodologies to refurbish the structural system of an old one-storey residential building, which has been built nearly two centuries ago in the North of Portugal, as well as to pave the way to deploy the methodologies identified in this document to similar buildings that were built using analogous technologies.

Special highlight will be given to all pathologies that affect wood structures, as well as to a wide array of rehabilitation and improvement techniques that can be deployed in this type of intervention.

The base strategy behind this thesis included a thorough inspection of the existing building with the aim of identifying all structural problems, followed by the definition of the most adequate strategies for intervening a building of this kind, one that showcases structural solutions and other building systems that are paradigmatic of an era.

Key-words: Structural Rehabilitation, Wood Structures, Wood Construction, Structural Repair and Strengthening

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO.....	5
ABSTRACT.....	6
INTRODUÇÃO.....	10
CASO EM ESTUDO – INSPECÇÃO	11
2.1 GERAL.....	11
2.2 FUNDAÇÕES.....	12
2.3 PAREDES	14
2.4 TETOS	17
2.5 COBERTURA.....	18
2.6 SOBRADO.....	20
2.7 ESCADAS	23
DIAGNÓSTICO.....	24
3.1 SOBRADO.....	24
3.2 TECTOS E ESTRUTURA DO TELHADO	28
TECNOLOGIAS DE REABILITAÇÃO ESTRUTURAL	30
4.1 REFORÇO DE PAREDES DE ALVENARIA COM CINTAS METÁLICAS E PREGAGENS 31	31
4.2 INSTALAÇÃO DE SEGUNDO FORRO DE SOALHO	31
4.3 REFORÇO COM INSTALAÇÃO DE SOLUÇÃO MISTA MADEIRA-BETÃO	32
4.4 SUBSTITUIÇÃO E/OU REFORÇO COM PERFIS E CHAPAS METÁLICAS.....	34
4.5 INTRODUÇÃO DE FRECHAS OU OUTROS ELEMENTOS DE APOIO EM PAREDES..	35
4.6 REFORÇO COM PRÓTESES DE MADEIRA LIGADAS POR ELEMENTOS METÁLICOS 36	36
4.7 REFORÇO COM PERFIS METÁLICOS INTERCALADOS COM VIGAS DE MADEIRA EXISTENTES.....	37
INTERVENÇÃO E SOLUÇÕES A ADOPTAR.....	38
5.1 SOBRADO.....	38

5.1.1.	PINTURA QUÍMICA PARA ELIMINAÇÃO DE INSECTOS XILÓFAGOS	38
5.1.2.	VERIFICAÇÃO DA ESTRUTURA DE MADEIRA DE ACORDO COM O EC5 APÓS MONTAGEM DE UM SEGUNDO FORRO DE SOALHO EM DIRECÇÃO PERPENDICULAR AO EXISTENTE E INSTALAÇÃO DE TARUGOS	38
5.1.2.1.	VERIFICAÇÃO À FLEXÃO.....	44
5.1.2.2.	VERIFICAÇÃO AO CORTE.....	44
5.1.2.3.	VERIFICAÇÃO AO CORTE NO PLANO PERPENDICULAR AO FIO.....	44
5.1.2.4.	VERIFICAÇÃO À TORÇÃO.....	45
5.1.2.5.	VERIFICAÇÃO À INSTABILIDADE LATERAL TORSIONAL	45
5.1.2.6.	CONTROLO DE DEFORMAÇÕES - ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO	47
5.1.2.7.	CONTROLO DE VIBRAÇÕES – ESTADO LIMITE DE UTILIZAÇÃO	48
5.1.3.	MONTAGEM DE VIGAS METÁLICAS PARALELAS AO VIGAMENTO SECUNDÁRIO – VERIFICAÇÃO SEGUNDO O EC3	50
5.1.3.1.	DEFINIÇÃO DA CLASSE DE SERVIÇO DO AÇO.....	51
5.1.3.3.	VERIFICAÇÃO AO CORTE.....	53
5.1.3.4.	CONTROLO DA DEFORMAÇÃO A MEIO VÃO – ESTADO LIMITE DE UTILIZAÇÃO ⁵⁴	
5.1.4.	DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE VIGAS EM MADEIRA LAMELADA DE PINHO NÓRDICO	58
	CONCLUSÕES.....	65
	BIBLIOGRAFIA.....	67

1

INTRODUÇÃO

Esta tese tem como objectivo identificar soluções para a reabilitação de edifícios centenários da região Norte de Portugal. O trabalho será essencialmente focado no caso de um edifício construído há cerca de dois séculos atrás na região de Viana do Castelo, que servirá de peça central para uma abordagem a diferentes técnicas de reabilitação disponíveis no actual mercado de construção.

Subsequente à fase de diagnóstico do edifício e após a identificação dos principais tipos de patologias, serão apresentadas diferentes técnicas de reabilitação, substituição e ou reforço de elementos construtivos e estruturais, que quer por se apresentarem em mau estado de conservação ou por não garantirem padrões de conforto adequados, necessitam de modificações de forma a garantir uma melhoria dos níveis de qualidade do edifício.

Os principais elementos em análise serão vigas e lajes de madeira, paredes de alvenaria de duplo pano, paredes de tabique, escadas e tetos em estuque. Estes elementos concentram tipicamente grande parte da riqueza arquitectónica do património edificado e a sua destruição em intervenções que se resumem simplesmente à conservação de fachadas tem sido uma prática corrente em Portugal, durante as últimas décadas.

A ditadura do betão e, em teoria, soluções aparentemente mais económicas que envolvem o seu uso, tem vindo a ser um factor preponderante para a destruição de património histórico, um cenário que lentamente tem vindo a ser revertido e que com uma maior consciencialização da população em geral poderá eventualmente ser ultrapassado.

Interessa assim continuar a aprofundar estudos nesta área e continuar a identificar soluções eficientes do ponto de vista económico e ambiental que permitam combater a supremacia do fachadismo e de soluções que privilegiem o uso de betão em detrimento da reabilitação do edificado existente.

Através da reabilitação, é perfeitamente viável garantir elevados padrões de conforto térmico e acústico, segurança estrutural e resistência ao fogo sem destruir o património existente, uma vez que as diversas tecnologias de construção disponíveis hoje em dia permitem conciliar o valor histórico e arquitectónico dos edifícios antigos com materiais modernos e de elevado desempenho, e que garantem elevados padrões de conforto.

Será com o objectivo de realizar a ponte entre a riqueza do antigo e o conforto do moderno que este trabalho será desenvolvido, para que a reabilitação do património seja cada vez mais focada na preservação do espólio existente.

2

CASO EM ESTUDO – INSPECÇÃO**2.1 GERAL**

O edifício que será alvo deste estudo detalhado terá sido construído no início do século XIX, tendo sofrido posteriormente várias intervenções de conservação e ampliação as quais têm permitido assegurar que a globalidade do edificado se mantém em boas condições e que permitem um grau satisfatório de conforto de utilização. O levantamento detalhado de todos as anomalias e problemas deste edifício irá permitir o desenvolvimento de estratégias de reabilitação quer a nível local – reabilitação de elementos específicos, quer a nível global – tratamento da globalidade do sistema estrutural e/ou outros.



Figura 1 – Aspecto geral da fachada Sul

Este edifício residencial possui um carácter histórico por ter funcionado durante o século passado como posto dos correios e posto de retalho central numa freguesia da cidade de Viana do Castelo. Encontra-se geminado a Poente por uma moradia de construção e elevação semelhantes, e a Nascente por ruínas de alvenaria de granito de uma habitação de piso único contemporânea deste edifício.

O corpo base do edifício em estudo consiste em várias paredes de granito, dispostas numa geometria que permite configurar três formas aproximadamente rectangulares, com vãos nunca excedendo os seis metros, formando basicamente três núcleos que devidamente interligados funcionam como garante da rigidez global do edifício:

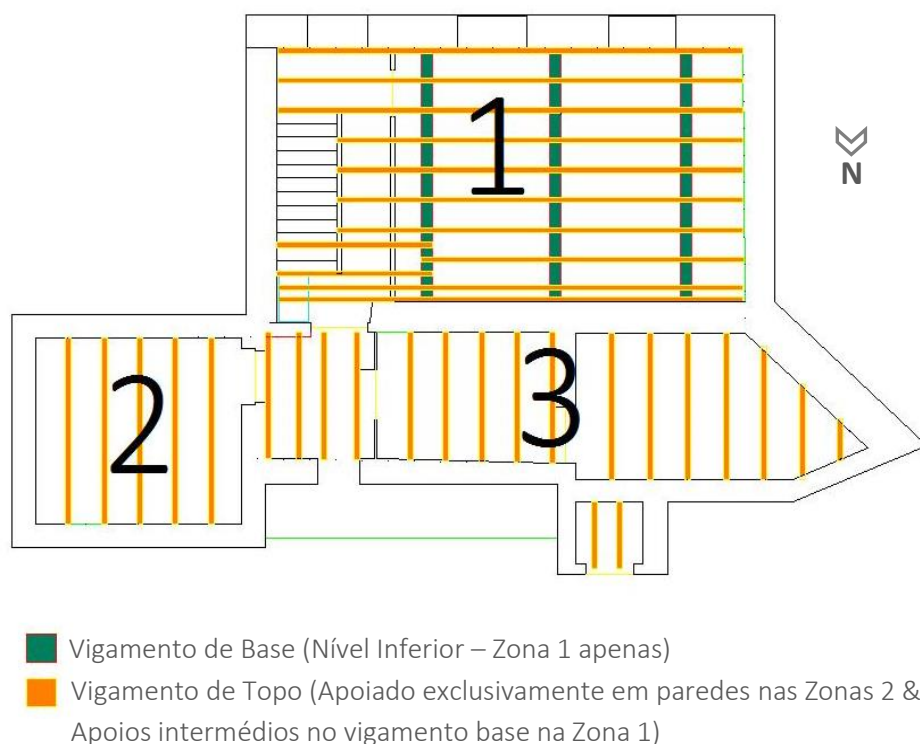


Figura 2 – Esquema geral de paredes e vigas

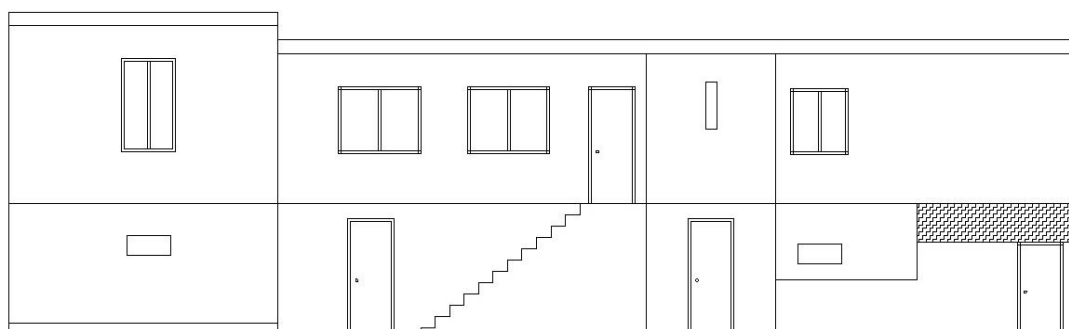


Figura 3 – Fachada Norte – Alçado

O uso de vigamento base apenas se verifica numa das áreas onde os vãos a vencer são de maior extensão, sendo que a norma é a presença de vigamento de topo sobre o qual assenta um sobrado de madeira.

A proximidade entre paredes, os vãos relativamente curtos e a geometria rectangular base garantem uma boa rigidez global de conjunto. Apresentada a estrutura base do edifício, interessa detalhar cada uma das suas componentes de forma a perceber o funcionamento global do edifício.

2.2 FUNDAÇÕES

Pelo facto de não existirem desenhos de construção do edifício e uma vez que inspecções de diagnóstico a esta componente do edifício não serem possíveis sem a execução de poços de fundação, que implicariam custos acrescidos significativos que não são justificáveis num estudo deste tipo, importa então adoptar métodos de inspecção indirectos através de

inspecções visuais que permitam a identificação da presença de assentamentos ou fendas relacionadas com fragilidade ou instabilidade das fundações.

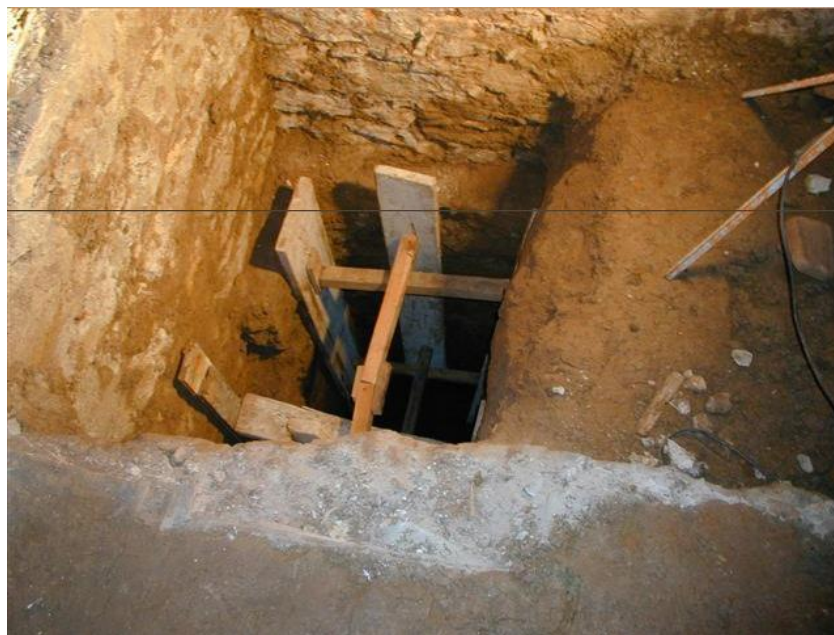


Figura 4 – Exemplo de Poço de Fundação

Em geral o edifício não apresenta sinais de assentamentos significativos, o que parece ser motivado por um eficaz sistema de fundação em alvenaria de pedra assente num afloramento granítico existente. Nenhuma das paredes apresenta qualquer tipo de fendas motivadas pelo assentamento do sistema de fundações e nenhum deslocamento de qualquer parte da estrutura motivado por instabilidade das fundações foi observado.

A inexistência de actividade sísmica significativa na região assim como a elevada qualidade do maciço de fundação, constituído por granito de cor cinzenta de alta densidade tem sido o garante da estabilidade do sistema de fundação construído em alvenaria de granito com uma largura que se supõe que seja superior à das paredes que suportam, um sistema que habitualmente inclui pedra aparelhada e que se designa por perpianho, rigidificado tipicamente por pedras transversais designadas de travadouros. A alvenaria das fundações possui a largura suficiente e profundidade adequada – até atingir o afloramento granítico, de forma a funcionar de forma estruturalmente equivalente a uma sapata de fundação.

Independentemente do tipo de intervenção a realizar, importa salientar que qualquer solução a adoptar deve privilegiar soluções que não conduzam ao agravamento do peso de nenhuma componente estrutural, nomeadamente paredes e lajes.

Importa salientar que cargas adicionais em paredes estruturais poderão conduzir a assentamentos pontuais de parte do edifício o que poderá originar fendas em paredes e lajes, além do enfraquecimento do sistema estrutural a nível global.

O agravamento de cargas em lajes ou a construção de lajes de betão armado, para além de indirectamente contribuir para uma sobrecarga das paredes estruturais com as desvantagens já identificadas, tem também uma grande contribuição para a diminuição da capacidade de resistência do edifício a esforços horizontais, nomeadamente a esforços gerados por forças sísmicas.

A introdução de lajes estruturais de maior peso, que não de elementos leves como a madeira tipicamente utilizada de raiz, resulta na amplificação de movimentos em caso de sismo, em resultado de esforços horizontais substancialmente mais elevados, em virtude do aumento de massa dos pisos do edifício.

Quer os sistemas de paredes de alvenaria, quer as fundações dos edifícios construídos nos séculos XVIII e XIX não se encontram preparados para receber de forma completamente segura solicitações, quer de peso adicional de lajes de betão armado, quer de eventuais esforços horizontais, motivados por forças sísmicas.

O uso de lajes de betão armado requer, por vezes, a utilização de sistemas estruturais de suporte adicionais adjacentes a paredes de alvenaria estruturais existentes, o que implica a construção de pequenos pórticos de suporte, muitas vezes com condições de fundação muito difíceis devido à presença das paredes estruturais referidas, o que poderá originar cargas excêntricas e gerar fenómenos de assentamento e deslocamentos inesperados.

Há ainda a salientar as diferentes propriedades dos materiais em questão – alvenaria e betão, o que não garante um funcionamento estrutural adequado devido ao diferente tipo de deformações e comportamento destes materiais quando submetidos a esforços e condições semelhantes.

Em geral, importa salientar que a preservação de lajes de madeira e/ou introdução de elementos leves de reforço garante não só um melhor comportamento estrutural do edifício, mas também a integridade das fundações.

2.3 PAREDES

As paredes exteriores do edifício são maioritariamente em alvenaria de pedra com uma espessura variável entre 380mm e 650mm. A exceção cabe apenas a parte das paredes do primeiro andar que, fruto de várias intervenções que o edifício sofreu, foram construídas primeiro em tabique e depois em alvenaria de argamassa e tijolo.



Figura 5 – Espessura da parede de fachada Sul – Detalhe

É expectável que as paredes de alvenaria de maior espessura sejam de pano duplo com preenchimento intermédio à base de cal ou outro material ligante, uma vez que este tipo de tecnologia de construção era bastante comum à época. As restantes paredes do rés-do-chão são em alvenaria de blocos de granito simples de pano único.

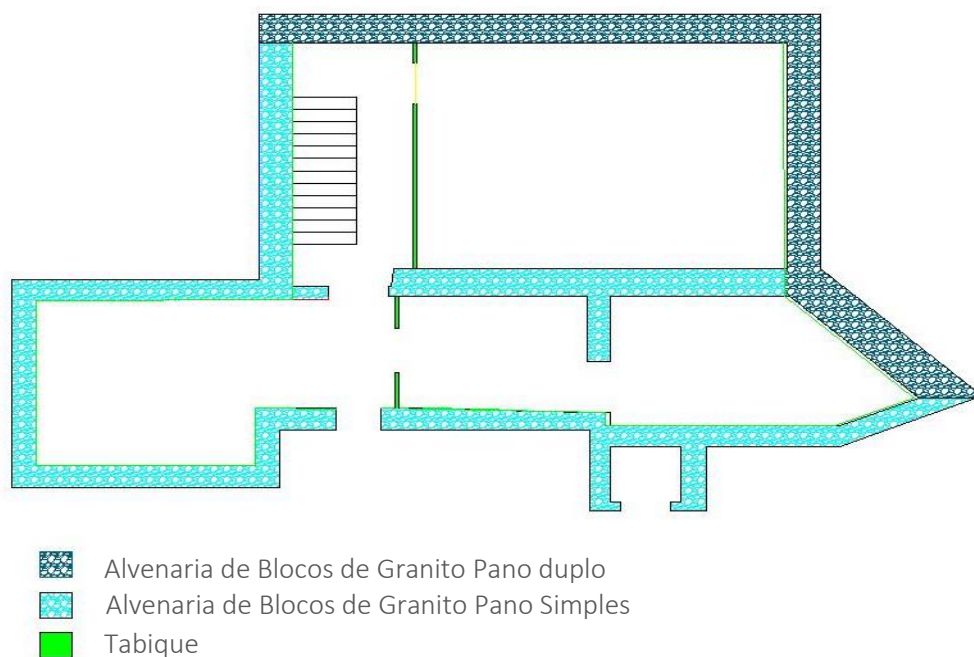


Figura 6 – Mapa de paredes do rés-do-chão

Como referido, no primeiro andar do edifício, a composição das paredes sofre algumas alterações em resultado de intervenções realizadas em data posterior à de construção original.

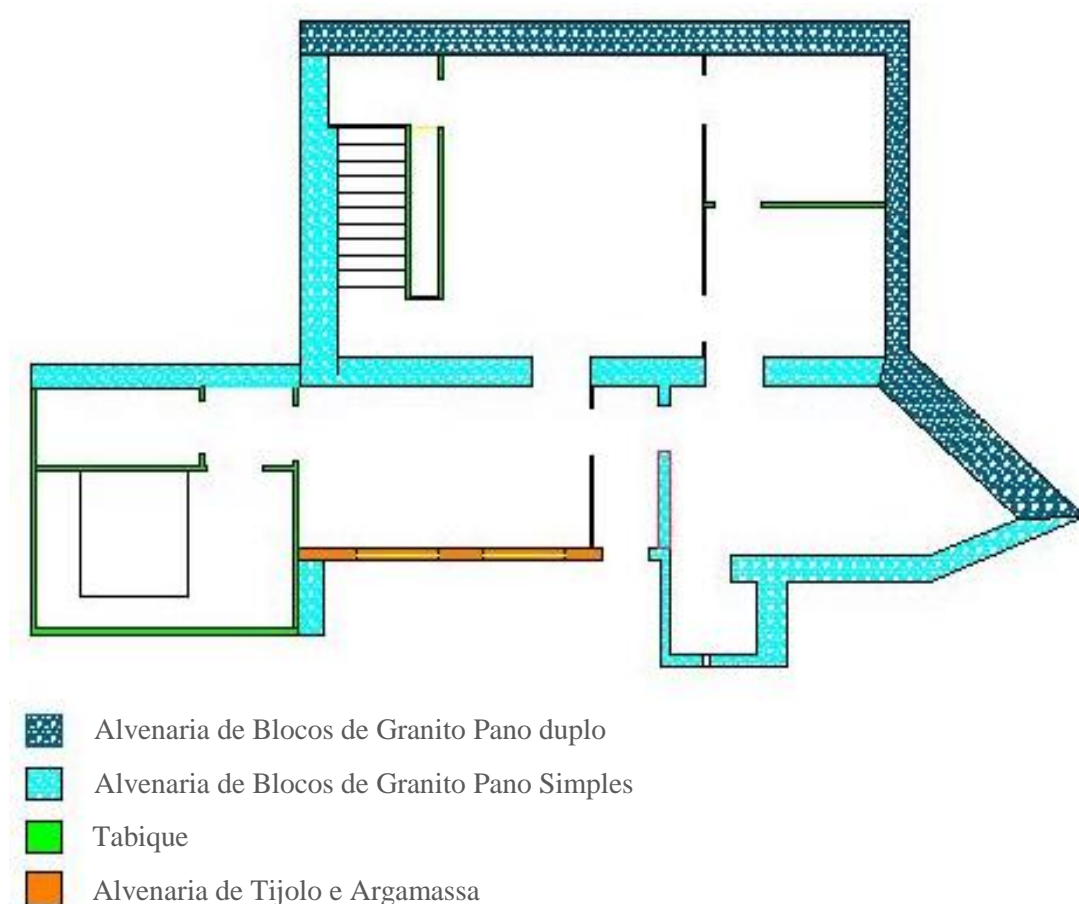


Figura 7 – Mapa de paredes do primeiro andar

O revestimento interior das paredes consiste em argamassa de cal e areia, revestido com estuque. Já o revestimento exterior é efectuado com argamassa de cimento de enchimento e regularização, com subsequente pintura ou caiagem, dependendo da parte do edifício em questão.



Figura 8 – Esquerda: parede de tabique e pormenor de cachorro em madeira ornamentado; Centro: parede de blocos de tijolo e argamassa; Direita: Pormenor de cachorro em argamassa

Em geral as paredes encontram-se em excelente estado de conservação padecendo apenas de patologias de fácil resolução que podem ser tratadas com relativa facilidade:

- Elevada humidade superficial no pano interno;
- Desagregação da argamassa de revestimento exterior e existência de pequenos orifícios;
- Perda de plasticidade da pintura exterior que igualmente permite a passagem de humidade,

contribuindo ainda mais para o desequilíbrio higrométrico do interior do edifício, com elevados níveis de humidade;

- Ausência de isolamento térmico o que conduz a variações de temperatura significativas num período reduzido de tempo, origina condensações, e aumenta de forma substancial o consumo energético do edifício – elevadas perdas de energia utilizada para o aquecimento do edifício durante os meses de Inverno.
- Portas e janelas de vidro simples com estrutura em madeira sem resistência térmica adequada contribuem para o agravamento dos problemas já referidos nos pontos anteriores, além de não garantirem os níveis de isolamento acústico necessários.

2.4 TETOS

Os tetos desta habitação são particularmente ricos em detalhe e ornamentados, com acabamentos em gesso. A estrutura de suporte dos elementos ornamentados consiste em ripas trapezoidais de pequena dimensão – fasquios, dispostos em forma de grelha, apoiados em vigamento secundário que por sua vez se encontram suspensos das asnas de suporte da cobertura:



Figura 9 – Esquerda: pormenor do fasquiado e vigamento secundário; Direita: Asnas, suporte do vigamento secundário e tarugos

É de salientar a inclusão de tarugos na estrutura de suporte do tecto, os quais estão alinhados com a direcção das asnas, e de forma perpendicular ao vigamento secundário. Os tarugos são utilizados na generalidade para conferir maior rigidez a vigamentos, e que se correctamente instalados, geram um efeito de diafragma capaz de distribuir de forma considerada uniforme a aplicação de cargas pontuais, diminuindo assim os esforços a nível local e assegurando que a estrutura colabora localmente na distribuição de cargas. Isto é particularmente importante no caso de pavimentos acessíveis, onde os tarugos desempenham um papel fundamental não só na redistribuição de cargas, mas também na diminuição de vibrações, pelo referido efeito de diafragma e também devido ao aumento da rigidez da estrutura.



Figura 10 – Detalhes dos ornamentos em gesso

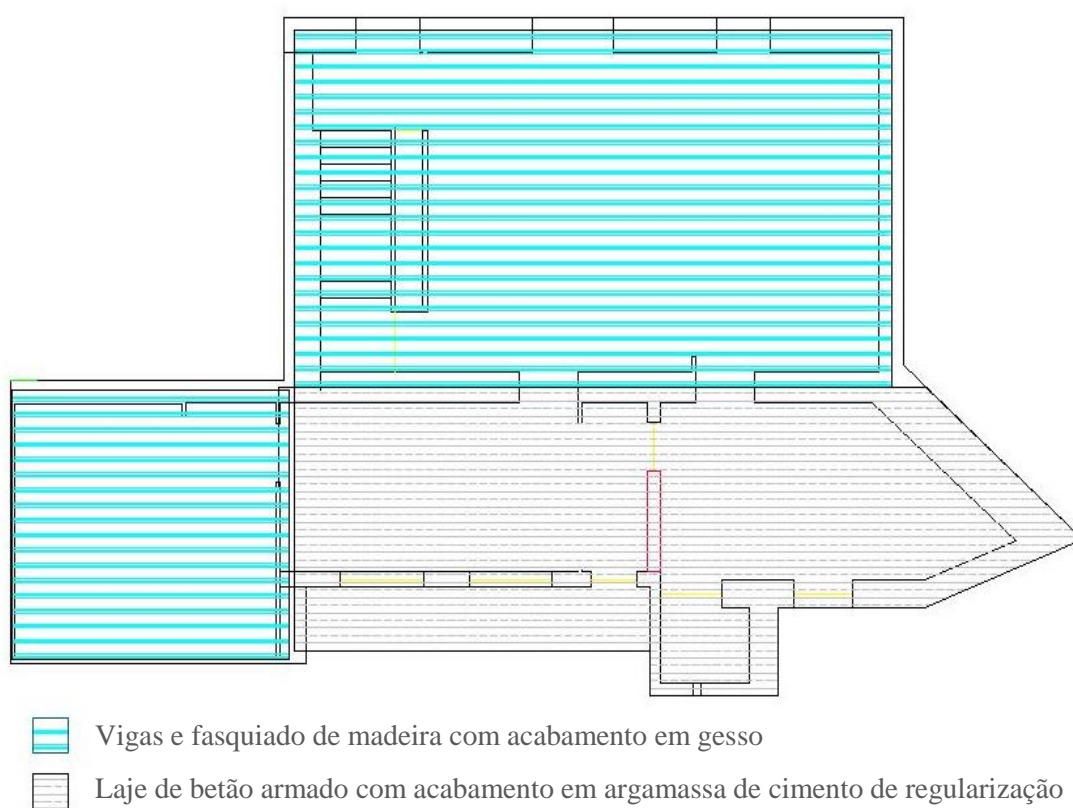


Figura 11 – Planta de caracterização das lajes de teto do 1º andar

2.5 COBERTURA

A cobertura do edifício apresenta duas partes distintas – um telhado de duas águas e uma segunda cobertura com uma estrutura distinta de quatro águas: O telhado de duas águas encontra-se assente em duas asnas com pendurais e escoras nas zonas intermédias e em dois paramentos de alvenaria de blocos cerâmicos e argamassa nas extremidades Nascente e Poente.

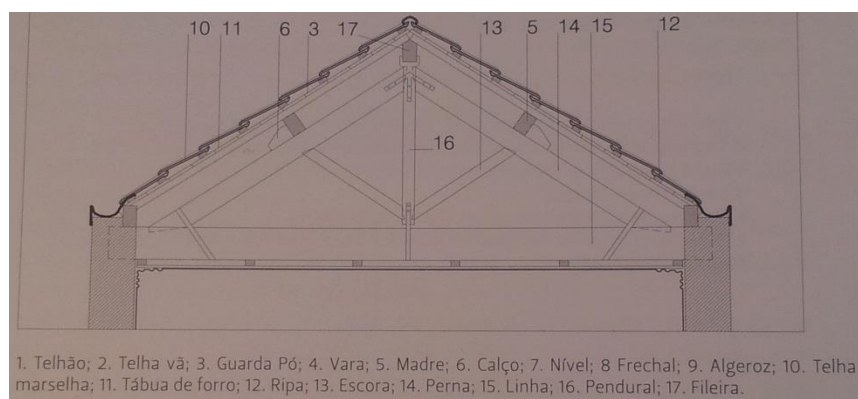


Figura 12 – Esquema das asnas de suporte da cobertura

A fotografia seguinte demonstra por um lado o bom estado de conservação da madeira, por outro há a salientar a evidente falta de protecção ao fogo, bem como a ausência de tratamento térmico e acústico desta parte do edifício. É visível também uma estrutura de suporte secundário não utilizada* que serviria de suporte a parte da cobertura antes da introdução das asnas de pendural e escoras.



Figura 13 – Aspecto das asnas de suporte da cobertura

O esquema de suporte e localização das várias asnas é mostrado na planta seguinte em que também se mostra o posicionamento relativo de cada um dos elementos estruturais da cobertura em relação à laje de betão armado que foi construída ao nível da cobertura aquando de uma das intervenções anteriores.

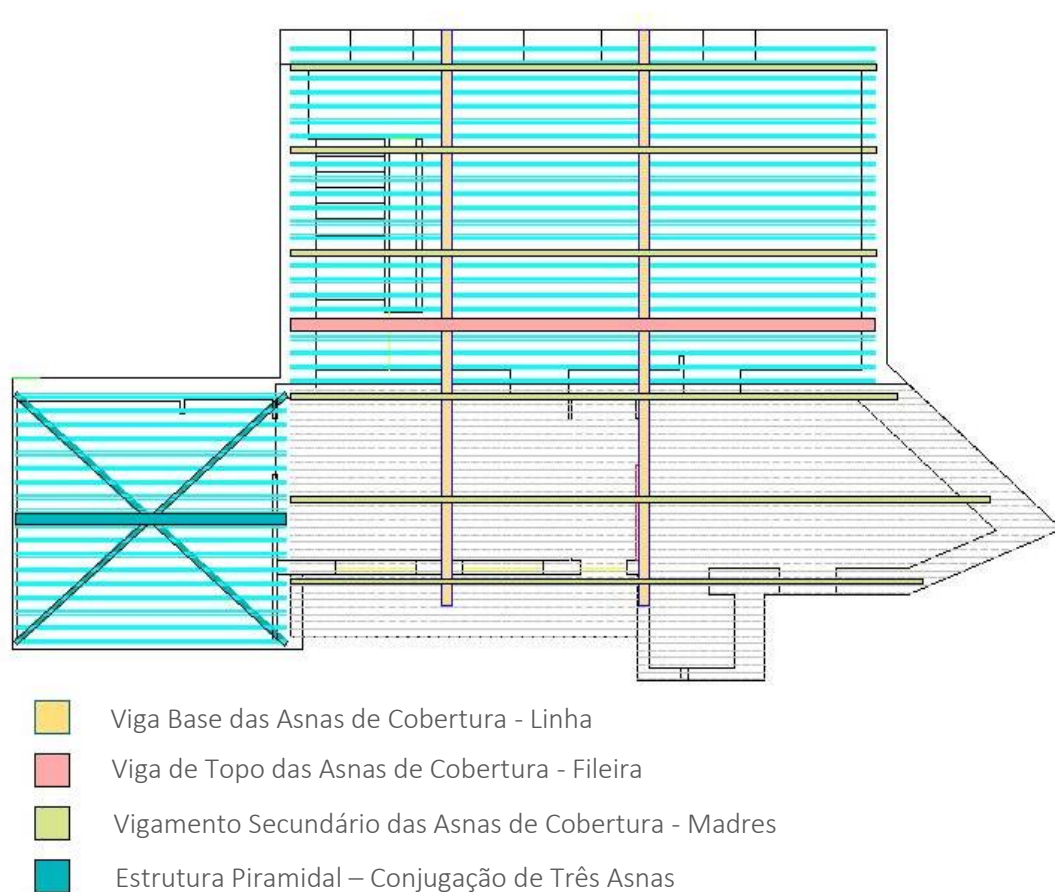


Figura 14 – Estrutura de suporte da cobertura

2.6 SOBRADO

Um dos elementos centrais deste edifício é o sobrado de madeira do primeiro andar, uma estrutura constituída por dois níveis de vigamento e soalho de madeira na zona 1 e vigamento simples nas zonas 2 e 3 (figura 15)

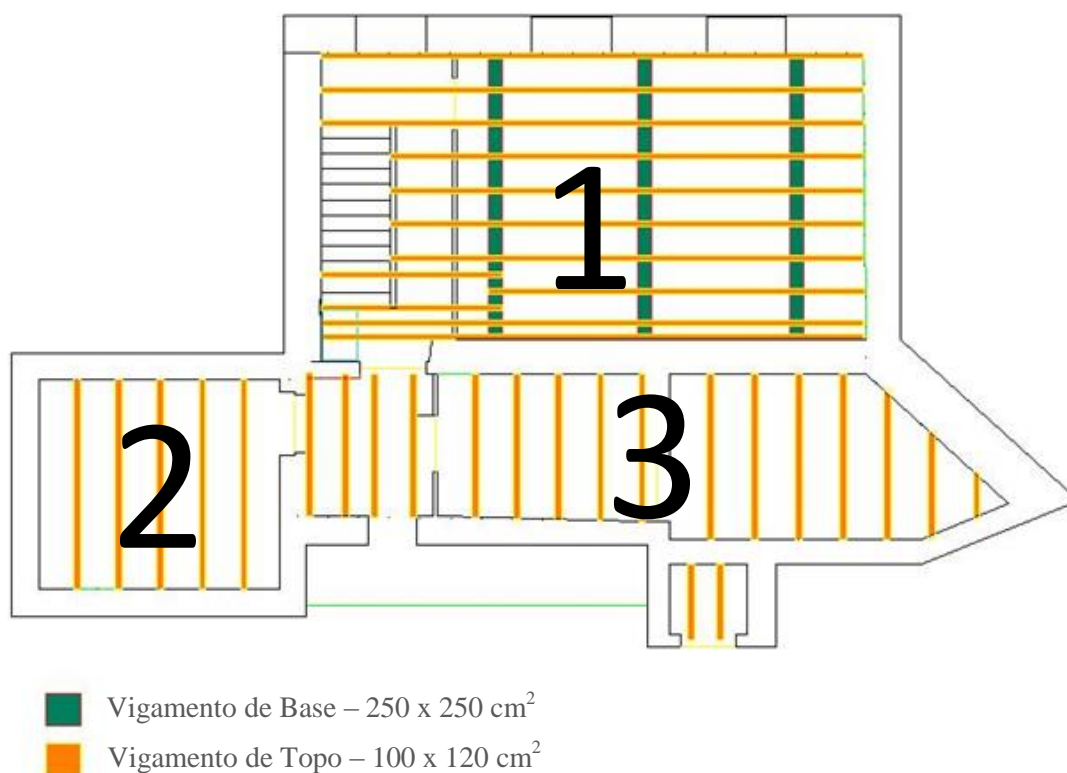


Figura 15 – Mapa do sistema de vigas de suporte do sobrado

O soalho de madeira tem uma espessura de três centímetros e encontra-se apoiado num sistema de vigas de secção 100 x 120 cm² com um espaçamento de 50 cm entre si. Na zona 1 do edifício, e por os vãos a vencer serem de maior extensão, existe um segundo nível de vigamento inferior que os divide de forma a minimizar os esforços de flexão e corte das vigas de topo.

Este vigamento inferior inclui apenas três vigas de secção aproximadamente rectangular de 250 x 250 cm² com um revestimento de tábuas de madeira, de forma a omitir as irregularidades das vigas originais, que são nada mais do que troncos rolados de pinheiro com tratamento mínimo de irregularidades e pintura de impregnação à base de alcatrão, em grande parte completamente desgastada por mais de um século de exposição a um ambiente agressivo de elevada humidade e que posteriormente criou condições para que se desencadeasse um ataque biótico em larga escala.



Figura 16– Vigamento Base – Viga V2 (Figura 18)

Um dos aspectos interessantes deste sobrado é o facto de o apoio na extremidade Sul se realizar através de um frechal de madeira destinado a assegurar uma distribuição uniforme das cargas transmitidas pelas vigas à parede.



Figura 17 – Vigamento Secundário e Frechal

2.7 ESCADAS

A singularidade e elegância das escadas de madeira deste edifício é outro aspecto de elevado interesse a preservar. Suportada por duas vigas de madeira apoiadas no vigamento secundário e por uma parede de tabique com uma viga de topo a Poente, as escadas desempenham um papel central na moradia pela forma simples mas estruturalmente eficiente como asseguram a ligação entre o piso térreo e o primeiro andar.



Figura 18 – Escadas – Vigas de Suporte e Parede de Tabique

3

DIAGNÓSTICO

3.1 SOBRADO

O sobrado do primeiro andar deste edifício apresenta actualmente duas anomalias importantes que devem ser corrigidas de forma a conferir à habitação um grau de conforto aceitável.

O primeiro problema desta laje é a vibração excessiva quando o pavimento é sujeito a acções dinâmicas simples, como o caminhar humano, acções que se traduzem em vibrações de frequências inferiores a 8 Hz, as quais seriam menos expectáveis caso o sobrado possuísse contraventamento adequado. Este problema resulta essencialmente do seguinte:

- a) Baixa espessura do soalho – 3cm apenas
- b) Inexistência de tarugamento de travamento no plano perpendicular às vigas de topo
- c) Diminuição da secção útil de vigas por ataque de insectos xilófagos
- d) Eventual sub-dimensionamento das vigas de suporte
- e) Fenómenos de fluência em que a aplicação quase sistemática e prolongada de cargas contribui para deformações permanentes de elementos estruturais e a uma flexibilização da estrutura



Figura 19 – Inexistência de travamento no plano perpendicular às vigas secundárias

O segundo problema desta componente do edifício é também uma das causas das vibrações excessivas já descritas – o ataque de insectos xilófagos (xilo - do Grego, madeira; fago – do Grego, comer). Estes insectos consomem a madeira da estrutura e contribuem para a redução de secções, diminuindo a capacidade de funcionamento estrutural dos vários elementos. Este ataque de insectos xilófagos é generalizado e estende-se à totalidade da estrutura: vigas e soalho.

O não tratamento deste ataque biológico poderá conduzir à inutilização total da estrutura. Além do tratamento químico disponível hoje em dia para este tipo de problema, importa notar que estes insectos proliferam em ambientes de humidade elevada e deficientes condições de ventilação.

Este edifício, por ter sido desenhado sem preocupações higrotérmicas, providencia um ambiente propício para a multiplicação deste tipo de insectos. Qualquer intervenção futura deverá não só quimicamente assegurar o fim desta colónia mas também garantir condições de temperatura e humidade aceitáveis que não propiciem este tipo de ataque.



Viga V1 – Perfurações de Insectos Xilófagos



Viga Vd1 – Idem



Viga V1 – Fendas de Secagem e Perfuração Causada por Insectos Xilófagos



Viga Vc5 – Ataque de Insectos Xilófagos em Estado Bastante Avançado

Figura 20 – Pormenor Do Ataque De Insectos Xilófagos no Soalho e Vigamento

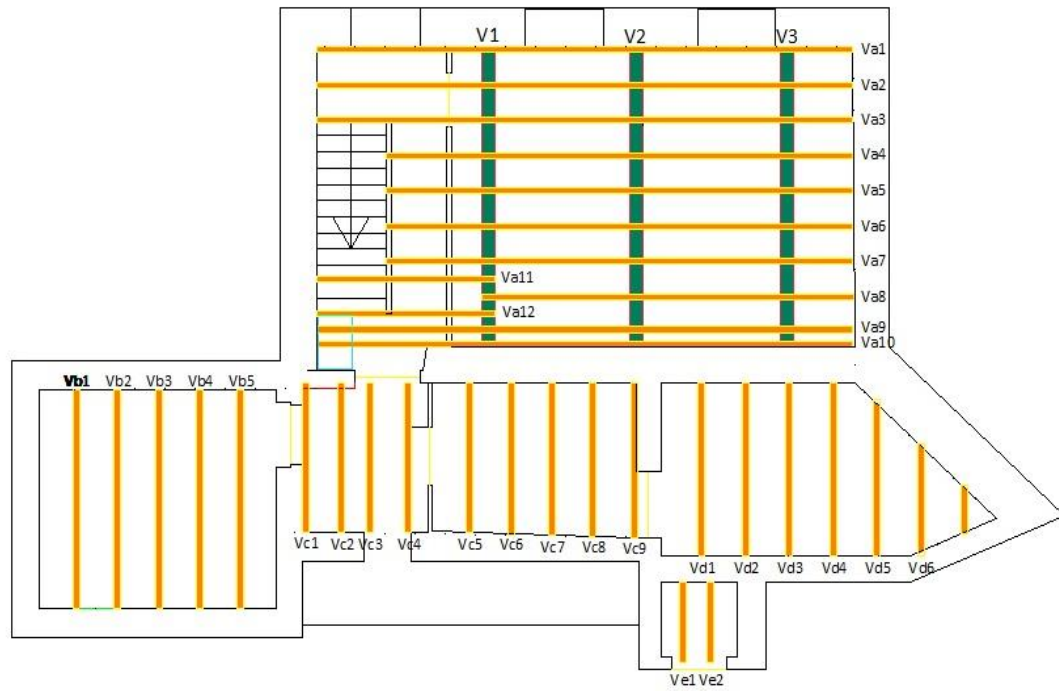


Figura 21 – Mapa de Vigas – 1º Andar

Quadro 1 – Diagnóstico Detalhado de cada uma das Vigas

Designação	Secção (m2)	Estado	Material	Apoios	Notas
V1	0.25x0.25	Razoável - Grande fenda longitudinal e ataque biótico	Pinho	Bom	Tratar ataque biótico, proteger contra o fogo e reforçar com vigamento metálico. Pintura de acabamento final necessária.
V2	0.25x0.25	Razoável - Ataque biótico	Pinho	Bom	
V3	0.25x0.25	Razoável - Ataque biótico	Pinho	Bom	
Va1	0.1x0.125	Razoável - Ataque biótico	Pinho	Bom	Rebaixar nível do vigamento em 25 mm para permitir a colocação de um segundo forro de soalho. Eliminar ataque biótico com tratamento adequado. Pintura anti-fogo e pintura de acabamento necessárias. Introduzir tarugamento em direcção perpendicular ao vigamento.
Va2	0.1x0.125	Razoável - Ataque biótico	Pinho	Bom	
Va3	0.1x0.125	Razoável - Ataque biótico	Pinho	Bom	
Va4	0.1x0.125	Razoável - Ataque biótico	Pinho	Bom	
Va5	0.1x0.125	Razoável - Ataque biótico	Pinho	Bom	
Va6	0.1x0.125	Razoável - Ataque biótico	Pinho	Bom	
Va7	0.1x0.125	Razoável - Ataque biótico	Pinho	Bom	
Va8	0.1x0.125	Razoável - Ataque biótico	Pinho	Bom	
Va9	0.1x0.125	Razoável - Ataque biótico	Pinho	Bom	
Va10	0.1x0.125	Razoável - Ataque biótico	Pinho	Bom	
Va11	0.1x0.125	Razoável - Ataque biótico	Pinho	Bom	
Va12	0.1x0.125	Razoável - Ataque biótico	Pinho	Bom	
Vb1	0.1x0.125	Excelente - Material Aplicado em 2010	Pinho	Bom	Tratamento preventivo de protecção contra ataque biótico, pintura anti-fogo e pintura de acabamento necessárias. Instalar tarugamento na direcção perpendicular ao vigamento.
Vb2	0.1x0.125	Excelente - Material Aplicado em 2010	Pinho	Bom	
Vb3	0.1x0.125	Excelente - Material Aplicado em 2010	Pinho	Bom	
Vb4	0.1x0.125	Excelente - Material Aplicado em 2010	Pinho	Bom	
Vb5	0.1x0.125	Excelente - Material Aplicado em 2010	Pinho	Bom	
Vc1	0.1x0.125	Razoável - fendas e ataque bótico	Pinho	Bom	Tratamento para eliminação de ataque biótico, pintura anti-fogo e pintura de acabamento necessárias. Instalar tarugamento na direcção perpendicular ao vigamento.
Vc2	0.1x0.125	Razoável - fendas e ataque bótico	Pinho	Bom	
Vc3	0.1x0.125	Razoável - fendas e ataque bótico	Pinho	Bom	
Vc4	0.1x0.125	Razoável - fendas e ataque bótico	Pinho	Bom	
Vc5	0.1x0.125	Razoável - fendas e ataque bótico	Pinho	Bom	
Vc6	0.1x0.125	Razoável - fendas e ataque bótico	Pinho	Bom	
Vc7	0.1x0.125	Razoável - fendas e ataque bótico	Pinho	Bom	
Vc8	0.1x0.125	Razoável - fendas e ataque bótico	Pinho	Bom	
Vc9	0.1x0.125	Razoável - fendas e ataque bótico	Pinho	Bom	
Vd1	0.1x0.125	Bom	Carvalho	Bom	Tratamento preventivo de protecção contra ataque biótico, pintura anti-fogo e pintura de acabamento necessárias. Instalar tarugamento na direcção perpendicular ao vigamento.
Vd2	0.1x0.125	Bom	Carvalho	Bom	
Vd3	0.1x0.125	Bom	Carvalho	Bom	
Vd4	0.1x0.125	Bom	Carvalho	Bom	
Vd5	0.1x0.125	Bom	Carvalho	Bom	
Vd6	0.1x0.125	Bom	Carvalho	Bom	
Ve1	0.1x0.125	Bom	Pinho	Bom	
Ve2	0.1x0.125	Bom	Pinho	Bom	

3.2 TECTOS E ESTRUTURA DO TELHADO

Grande parte dos tectos em gesso apresenta assentamentos significativos que podem ser corrigidos com a introdução de estruturas de suporte adicionais, ou tirantes que previnam o agravamento de assentamentos.



Figura 22 – Deformação dos Elementos de Suporte do Tecto e Sujidade Acumulada



Figura 23 – Pormenor da Ligação do Vigamento de Suporte à Pareda de Poente e Claraboia



Figura 24 – Pormenor do Tecto em Estuque e Assentamentos

O elevado grau de sujidade e detritos acumulados na parte superior dos tectos, conjugado com o facto de que a madeira da estrutura de suporte, quer dos tectos, quer da cobertura não possuir tratamento ao fogo, faz com que esta componente do edifício seja de risco de incêndio elevado e careça de uma intervenção urgente de forma a corrigir esta situação.

4

TECNOLOGIAS DE REABILITAÇÃO ESTRUTURAL

Neste capítulo irão abordar-se várias tecnologias de intervenção estrutural relevantes para o caso em estudo. Embora a intervenção final venha a privilegiar alguns métodos em detrimento de outros, importa fazer uma abordagem mais abrangente de forma a identificar alguns procedimentos que possam vir a ser relevantes no futuro para este edifício ou outros semelhantes.

Neste edifício, a metodologia de reabilitação e reforço a utilizar incluirá, de uma forma sumária, a instalação de novas vigas metálicas para substituição de algumas das vigas existentes, a instalação de novas vigas de madeira, no caso das vigas de topo, assim como o tratamento químico para eliminação de insectos xilófagos.

Em geral, qualquer intervenção num edifício antigo deve ser presidida em geral pelos seguintes princípios:

- Sempre que possível e sempre que o espólio existente possa ser reabilitado, ou reaproveitado deve procurar-se preservar o máximo da estrutura original do edifício. Isto não só garante que a preservação da identidade do edifício, mas também garante que os custos económicos e ambientais da intervenção serão de menor escala.
- Garantir que a nova intervenção é documentada o melhor possível de forma a facilitar futuras intervenções.
- No que diz respeito a elementos estruturais de madeira, deve evitar-se a sua exposição a elementos capazes de reter água como alguns tipos de argamassas cimentícias e assegurar que os apoios possuem o mínimo de ventilação necessária para evitar o apodrecimento da madeira.
- O nível de solicitação mecânica dos elementos estruturais de madeira deve ser baixo de forma a evitar deformações permanentes e deterioração de propriedades mecânicas do material por fenómenos de fluência.
- A intervenção deve ser caracterizada por um carácter de reversibilidade que permita que no caso de surgir algum tipo de incompatibilidade entre a nova intervenção e o existente, se possa com alguma facilidade reverter para a situação original.
- A eliminação das anomalias deve focar-se não só no tratamento dos sintomas que os elementos apresentam, como por exemplo – a pincelagem ou aspersão de áreas afectadas por culturas bióticas, mas também e de forma igualmente importante nas causas, ou factores de base que criam condições propícias para que as mesmas anomalias se desenvolvam, designadamente humidade excessiva, ou níveis de solicitação excessivos do material.
- Cada intervenção deve ser ajustada à singularidade dos problemas de que cada edifício padece, e embora à partida se possa idealizar determinado tipo de intervenção com base em

conhecimento adquirido, é de fundamental importância que a intervenção seja ajustada em termos de escala e natureza a cada tipo de situação.

- A incompatibilidade entre materiais deve ser tida em conta, nomeadamente no que diz respeito às propriedades higroscópicas da madeira, o que pode conduzir a variações importantes do seu volume. Por outro lado, materiais como o aço apresentam um coeficiente de expansão térmico elevado, e no caso de se apontar para uma solução que envolva aço/madeira é necessário existirem cuidados especiais de forma a minimizar o número de ligações rígidas entre dois materiais com características significativamente distintas. Rotura em caso de rigidificação excessiva é um fenómeno plausível.

De seguida far-se-á uma análise a algumas das técnicas de reabilitação e reforço mais relevantes.

4.1 REFORÇO DE PAREDES DE ALVENARIA COM CINTAS METÁLICAS E PREGAGENS

A instalação de cintas metálicas e/ou tirantes no exterior do edifício, ao nível das vigas de pavimento, contribui para uma melhor ligação pavimento parede e assegura que as paredes de empena solta são devidamente travadas no caso de ocorrerem solicitações horizontais extraordinárias, como acções causadas por sismos.

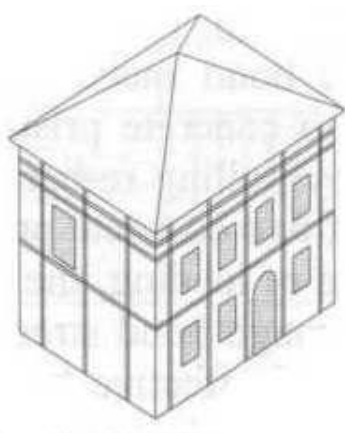


Figura 25 – Cintagem de edifício

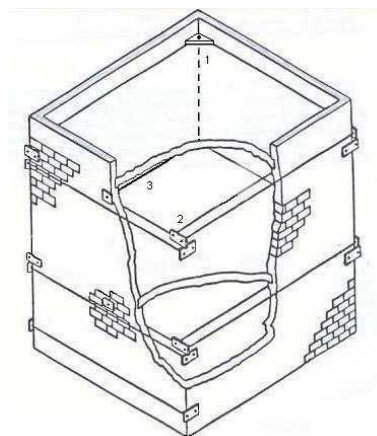


Figura 26 – Pregagens Longas ou Tirantes

A cintagem e a pregagem do edifício são soluções mecânicas que maximizam o seu potencial colaborante, no sentido em que os pavimentos passam a usufruir de uma melhor integração com as paredes, o que contribui para uma melhoria global do seu comportamento estrutural.

Este tipo de solução, embora confira bastante estabilidade a edifícios deste tipo, é de mais fácil implementação em edifícios não geminados, o que não é o caso da habitação em estudo.

4.2 INSTALAÇÃO DE SEGUNDO FORRO DE SOALHO

Esta será umas das metodologias a utilizar e que consiste na pregagem de um segundo forro de soalho sobre o existente, após adequado tratamento químico contra os insectos xilófagos. Esta técnica poderá levantar alguns problemas dado que o aumento de espessura do soalho criará inconvenientes ao nível da cota do pavimento, o que poderá ser solucionado pelo rebaixamento do vigamento de substituição aquando da sua instalação.

Uma variante deste tipo de intervenção consiste em adicionar chapas ou barras metálicas pregadas ao soalho e ligadas às paredes por um sistema de ferrolho para rigidificar ainda mais o pavimento, de forma a maximizar a resistência ao corte.

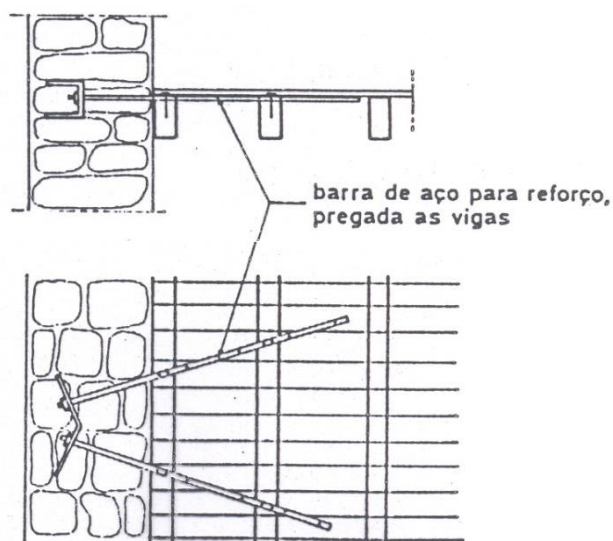


Figura 27 – Pregagens Longas ou Tirantes

4.3 REFORÇO COM INSTALAÇÃO DE SOLUÇÃO MISTA MADEIRA-BETÃO

Outra solução que poderá ser pontualmente utilizada neste edifício, mas que não é de todo ideal, é a criação de um pavimento misto madeira-betão. Este tipo de reforço possui algumas virtudes como o facto de contribuir para uma melhor redistribuição de cargas, rigidificação do pavimento, melhoria no comportamento do pavimento a vibrações de baixa frequência e impermeabilização de zonas húmidas.

Como aspectos negativos há a salientar que este tipo de pavimento agrava o peso do sistema estrutural, o que contribuiria para uma deterioração do comportamento do pavimento a esforços horizontais.

Neste tipo de solução, o soalho de madeira funciona como cofragem perdida sobre o qual se deve aplicar uma tela ou outro material impermeabilizante de forma a garantir isolamento total face a água do betão em fase de betonagem e também face a toda a humidade subsequente já em fase de utilização. Em seguida, poderá ser instalada uma armadura construtiva em rede electrossoldada ou varões de pequena dimensão de forma a acentuar o efeito de diafragma que se pretende que esta nova camada venha a proporcionar ao pavimento.

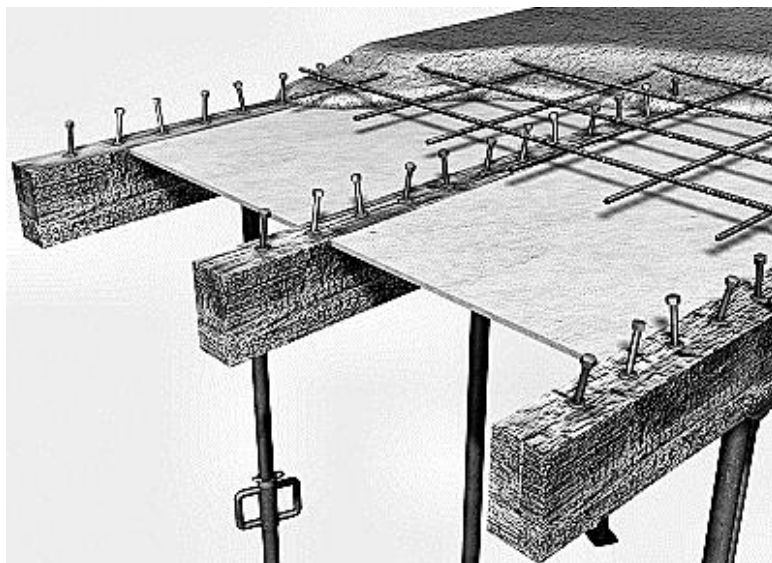


Figura 28 – Solução Mista Madeira Betão

Um dos aspectos mais importantes desta solução prende-se com a ligação madeira betão, a qual deve ser efectuada por elementos como pregos, cavilhas, parafusos, chapas dentadas, entre outros. O EC5 dedica alguns capítulos a este domínio e estabelece algumas regras que deverão ser observadas aquando do dimensionamento e instalação.

Neste âmbito, existem duas metodologias de cálculo diferenciadas: uma primeira em que se assume como hipótese base que a ligação madeira betão é rígida e uma outra em que é dado que esta mesma ligação é flexível, existindo escorregamento entre ambos os materiais, o que introduz maior complexidade no cálculo, uma vez que se torna necessário considerar coeficientes de escorregamento entre materiais. Vários autores propõem a adopção quer de um quer de outro método o que resulta em pequenas diferenças a nível de cálculo, sendo que porém o método em que se assume haver deslizamento ser considerado como capaz de gerar resultados mais credíveis e de implementação mais fácil.

A importância das ligações madeira betão prende-se também com o facto de ser necessário garantir que os esforços de compressão sejam absorvidos pelo betão e que os esforços de tracção sejam transmitidos à madeira, pelo que importa considerar uma série de factores importantes:

- A estrutura de betão deve ser dimensionada de acordo com o EC2 sem qualquer tipo de consideração para a resistência deste material à tracção, de forma a otimizar o potencial de resistência à tracção da madeira.
- Para efeitos de cálculo, deve efectuar-se um estudo detalhado de pontos da estrutura em que possa haver um agravamento localizado do nível de tensões em virtude de alterações significativas das propriedades dos materiais ou presença de cargas concentradas que levam a que haja uma concentração de tensões em determinada área.
- O atrito entre materiais ou qualquer outro tipo de factor de aderência entre superfícies deve ser menosprezado para efeitos de cálculo de ligações

Em geral, este tipo de solução permite ganhos de resistência estrutural significativos, essencialmente à flexão, bem como uma melhoria do efeito de diafragma que se traduz em

menos vibrações e maior capacidade de carga. É também de realçar que quer o isolamento térmico quer acústico são beneficiados por esta solução dada a maior espessura deste pavimento, o que acaba também por ser um dos seus pontos fracos, uma vez que o aumento de peso que embora possa ser minimizado com o uso de betões leves, acaba sempre por influir significativamente e negativamente no peso da estrutura, com as implicações já notadas anteriormente.

4.4 SUBSTITUIÇÃO E/OU REFORÇO COM PERFIS E CHAPAS METÁLICAS

A introdução de perfis metálicos pode ser efectuada de várias formas, sendo que as mais relevantes para este tipo de construção obedecem essencialmente a duas estratégias: uma primeira em que se procede à solidarização entre a madeira e o aço de forma a aproveitar parte da capacidade resistente residual das viga de madeira, e uma outra em que se procede à substituição total das vigas de madeira no caso da madeira já não preencher os requisitos mínimos de resistência estrutural, em virtude de um processo de deterioração avançado.

No primeiro caso importa salientar a importância de ventilar os apoios da viga metálica adjacentes aos apoios existentes da viga de madeira de forma a evitar a sua fragilização por patologias associadas a elevado teor de humidade.

Em ambos os casos importa realçar o facto de que é importante que os apoios da nova viga metálica se integrem perfeitamente na alvenaria existente, e que estes sejam efectuados com fragmentos de alvenaria de pedra em mistura com uma argamassa compatível com o material constituinte das paredes, de forma a garantir o bom comportamento dos apoios e prevenir assentamentos indesejados em fase de carga.



Figura 29 – Substituição de Parte do Vigamento por Perfis Metálicos

A utilização de chapas metálicas pressupõe a conservação das peças de madeira existentes e manutenção da secção existente, sendo que idealmente todas as peças de madeira deverão ser tratadas antes da anexação das chapas metálicas. Esta técnica possui algumas condicionantes, nomeadamente um elevado impacto visual e também o facto de requerer manutenção constante, uma vez que os parafusos de fixação à madeira requerem aperto/ajuste regular de

modo a eliminar folgas geradas pela variação volumétrica da madeira, sendo por isso uma técnica com um espectro de uso algo limitado.

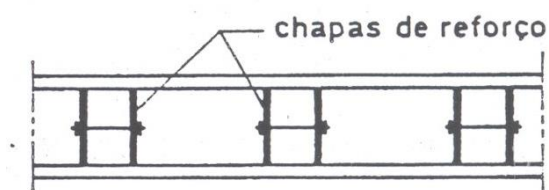


Figura 30 – Esquema típico de reforço de Vigas de Madeira com Chapas Metálicas

O contacto entre as vigas madeiras e metálicas deve também ser devidamente tratado de forma a evitar a amplificação de vibrações e ruídos de percussão que podem ser transmitidos caso não haja um elemento passivador entre as superfícies metálicas e de madeira.

4.5 INTRODUÇÃO DE FRECHAIS OU OUTROS ELEMENTOS DE APOIO EM PAREDES

O frechal – um elemento de suporte fixado às paredes do edifício ao nível do pavimento, funciona como um apoio contínuo ao longo da parede e permite uma melhor distribuição na transmissão das cargas de pavimentos às paredes. Os sistemas de apoios convencionais concentram as cargas das vigas em zonas pontuais das paredes, o que as fragiliza e não permite activar outras zonas da parede em caso de solicitações mais fortes. Abaixo encontra-se um exemplo de um frechal tradicional em madeira:



Figura 31 – Frechal de Madeira

Estes elementos são tipicamente apoiados em cachorros de pedra com o seguinte esquema de apoio:

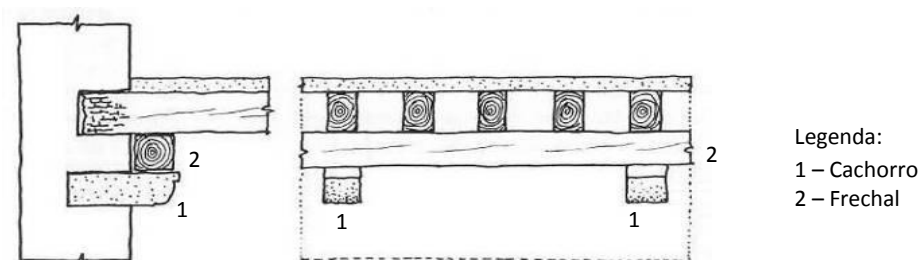


Figura 32 – Cachorros em Pedra e Frechal – Corte e Alçado

Os frechais podem no entanto originar outro tipo de problemas nas paredes de alvenaria uma vez que as cargas por eles transmitidas são-no de uma forma excêntrica, podendo por isso dar origem a esforços de flexão excessivos que podem não ser suportados por paredes fragilizadas ou de pouca resistência.

Uma solução alternativa ao frechal de madeira mas em todo semelhante do ponto de vista estrutural é a fixação de uma cantoneira de aço à parede. Esta solução, pelo facto de a cantoneira metálica assegurar uma melhor distribuição de cargas, dado o bom desempenho do aço à flexão e tracção, é mais desejável do que a anterior, embora também levante algumas preocupações a nível arquitetónico uma vez que nem sempre é possível minimizar o seu impacto visual.



Figura 33 – Cantoneira Metálica Antes de Aparafusamento a Parede de Alvenaria

4.6 REFORÇO COM PRÓTESES DE MADEIRA LIGADAS POR ELEMENTOS METÁLICOS

Esta solução deve ser utilizada sempre que haja partes da estrutura de madeira bastante fragilizadas, como seja no caso de fendas em vigas ou diminuição significativa da sua secção útil por ataque biótico, entre outros.

As ligações entre elementos devem ser dimensionadas de acordo com o EC5, sendo que segundo vários autores, a altura das peças a instalar deve ser igual à das vigas existentes e ter uma extensão igual a pelo menos metade da peça a reforçar de forma a assegurar um funcionamento estrutural eficaz em que existe integração total entre materiais.



Figura 34 – Reforço com Peças de Madeira em Ambas as Faces e Fixação com Parafusos Metálicos

Uma das principais preocupações em relação a este método e uma das principais razões que contribuem para reduzir a sua fiabilidade é o facto de as peças novas de madeira se encontrarem em contacto e expostas a madeira degradada e alterada por agentes susceptíveis de a deteriorarem. De forma a prevenir potenciais danos deve remover-se a componente afectada da madeira antiga, sendo a espessura de material a adicionar determinada em obra em função da dimensão da área contaminada.

4.7 REFORÇO COM PERFIS METÁLICOS INTERCALADOS COM VIGAS DE MADEIRA EXISTENTES

Esta é uma solução interessante a vários níveis uma vez que o novo vigamento é introduzido paralelamente ao existente e de forma intercalada. Tem como principais vantagens:

- O facto de ser um método pouco intrusivo que se integra bem com o vigamento existente é um factor positivo do ponto de vista arquitectónico;
- Contribui para um aumento significativo da rigidez do pavimento de madeira e diminui o nível de vibrações e deformabilidade;
- Reduz o nível de carga das vigas existentes;

Por outro lado esta solução acarreta normalmente um certo tipo de problemas:

- Diferenças importantes entre o módulo de elasticidade da madeira e do aço implicam que ambos os materiais funcionem de forma diferenciada, podendo levar a que, no limite, apenas o aço receba todas as cargas depois de a madeira ter sofrido um processo de deformação irreversível ou de difícil reversibilidade.

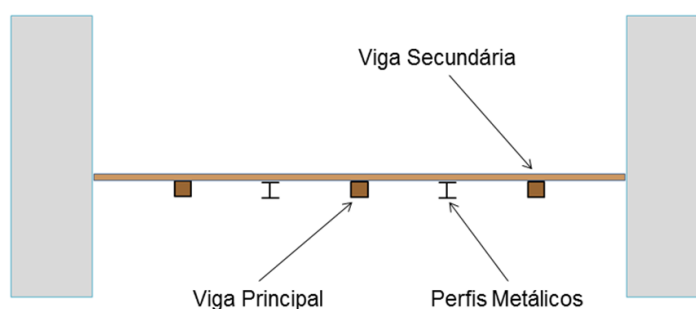


Figura 35 – Perfis Metálicos Intercalados com Vigas de Madeira Existentes

5

INTERVENÇÃO E SOLUÇÕES A ADOPTAR

5.1 SOBRADO

As soluções a adoptar para tratar as anomalias identificadas na fase de diagnóstico passam por:

- a) Pintura química para eliminação de insectos xilófagos;
- b) Montagem de um segundo forro de soalho em direcção perpendicular ao existente;
- c) Montagem de vigas metálicas paralelas ao vigamento de base (zona 1 apenas);
- d) Montagem de tarugos de travamento horizontal na perpendicular ao vigamento de topo
- e) Melhoria do comportamento higrométrico do edifício por introdução de isolamento térmico de paredes e cobertura, assim como de portas e janelas de vidramento duplo (estudo térmico detalhado para avaliar necessidades de isolamento deve ser preparado)

5.1.1. PINTURA QUÍMICA PARA ELIMINAÇÃO DE INSECTOS XILÓFAGOS

Este tratamento pode ser efectuado com um produto de preservação em base de solvente orgânico, destinado ao tratamento preventivo e curativo de madeiras de construção e mobiliário.

O produto deverá ser insecticida, fungicida e termiticida, destinado ao tratamento preventivo e curativo, e deverá ser aplicado por aspersão, pincelagem ou injeção em todas as madeiras atacadas, tanto no interior como no exterior.

Várias empresas disponibilizam uma gama completa de produtos que permitem um tratamento eficaz deste tipo de patologias.

5.1.2. VERIFICAÇÃO DA ESTRUTURA DE MADEIRA DE ACORDO COM O EC5 APÓS MONTAGEM DE UM SEGUNDO FORRO DE SOALHO EM DIRECÇÃO PERPENDICULAR AO EXISTENTE E INSTALAÇÃO DE TARUGOS

Após o tratamento químico anterior, uma das soluções a implementar é a instalação de um segundo forro de soalho de 30mm de espessura, numa direcção perpendicular ao tabuado existente. Uma maior espessura aliada ao facto de o fio da nova madeira se encontrar disposta numa direcção perpendicular à da madeira existente proporciona uma melhor distribuição de cargas e uma melhoria do comportamento do pavimento a acções dinâmicas susceptíveis de gerar vibrações de baixa frequência.

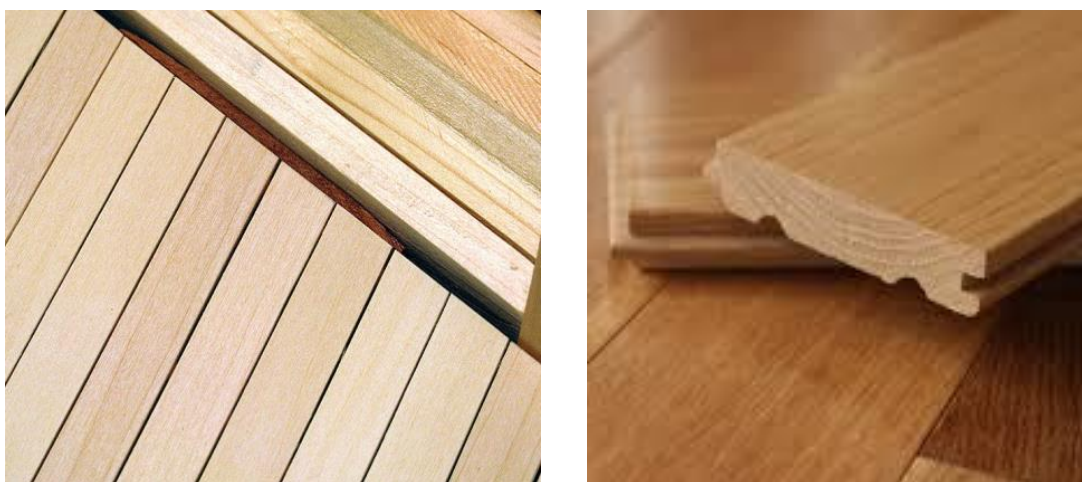


Figura 36 – Aplicação de um Segundo Forro de Soalho em Direcção Perpendicular ao Existente

Para a zona 1 do edifício, a verificação deste pavimento irá ser efectuada tendo em conta que o nível de vigamento inferior irá manter a mesma configuração, e irá continuar a suportar as vigas secundárias do nível superior. No entanto, as vigas de madeira do vigamento secundário, embora se encontrem num estado razoável de conservação, serão substituídas na íntegra uma vez que se encontram sujeitas a um ataque biológico que motivou a sua deterioração com destruição permanente de secções transversais resistentes, uma anomalia para a qual não é possível garantir um tratamento completamente eficaz e que poderá levar à contaminação dos novos elementos de madeira a ser instalados.

Por suas vez as vigas de madeira principais do nível inferior encontram-se submetidas não só a um severo ataque biológico mas também apresentam fendas de secagem pelo que deverão ser substituídas por perfis em aço S235 HEB 220, perfis que possuem uma altura de secção semelhante às vigas existentes e que como tal se enquadrarão perfeitamente a nível arquitetónico.

As vigas metálicas serão verificadas de acordo com o EC3 no ponto seguinte. As vigas originais de madeira de pinho irão ser retiradas e analisadas por pessoal especializado em obra de forma a avaliar a extensão dos danos e eventualmente reutilizadas na substituição de vigas danificadas nas zonas 2 e 3, zonas onde igualmente se manterá o sistema estrutural original, adicionando apenas contraventamento a meio vão, com vigas de altura semelhante.

Quadro 2 - Acções a Considerar – Combinações e quadro de entrada

Elemento	Carga (KN/m)	Tipo	Nota de quantificação
Soalho	0.22	Permanente – Peso Próprio	$e=6\text{cm}$; $\gamma_M=600\text{kg/m}^3$; Largura de Influência = 0.6m
Viga	0.07	Permanente – Peso Próprio	$A=0.1*0.12\text{m}^2$; $\gamma_M=600\text{kg/m}^3$;
Sobrecarga 1	1.2	Sobrecarga	RSA (geral – habitação) $q = 2 \text{ kN/m}^2$; Largura de Influência=0.6m
Sobrecarga 2	0.8	Sobrecarga	RSA (paredes divisórias); $\gamma_{\text{tabique}}=1.3\text{KN/m}^3$; $h_{\text{tabique}}=2.6\text{m}$; $q=0.4\text{g}$; Largura de Influência=0.6m

Quadro 3 - Combinações de Acções

Estados Limites Últimos	Acções Variáveis	$\gamma_q = 1.5$
	Acções Permanentes Desfavoráveis	$\gamma_g = 1.5$
	Acções Permanentes Passíveis de Determinação Rigorosa	$\gamma_g = 1.35$
	Acções Permanentes Favoráveis	$\gamma_g = 1.0$
Estados Limites de Utilização		$\gamma_g = 1.0$

Quadro 4 - Coeficientes de Redução de Acções Variáveis

Tipo de Utilização	ψ_0	ψ_1	ψ_2
a) Edifício de habitação para uso de carácter privado	0.4	0.3	0.2

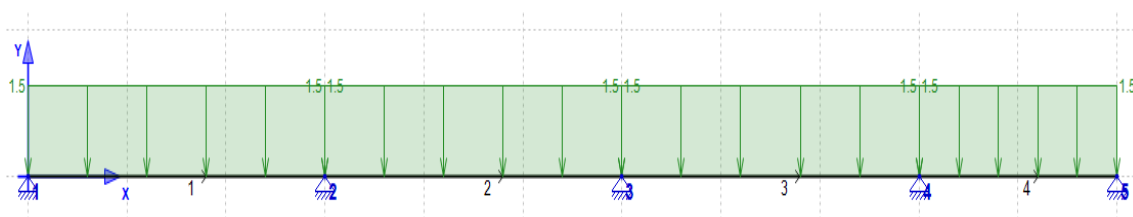
Quantificação da carga distribuída actuante (p) actuante na viga

$$p = \gamma_g \sum_{i=0}^i G_i + \gamma_q \sum_{i=0}^i (\psi_{i0} \times Q_i)$$

$$= 1.35 \times (0.22 + 0.7) + 1.5 \times (0.4 \times (1.22 + 0.8)) = 1.5 \text{ kN/m}$$

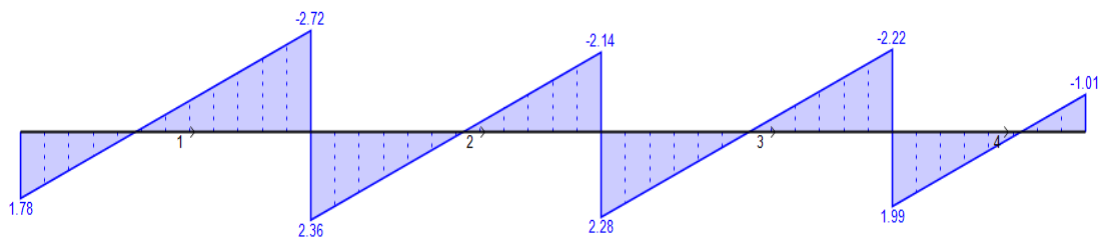
Caracterização da viga e apoios

Cada uma das vigas secundárias possui quatro vãos e encontra-se simplesmente apoiada em apoios intermédios – vigamento principal inferior, e paredes de alvenaria.

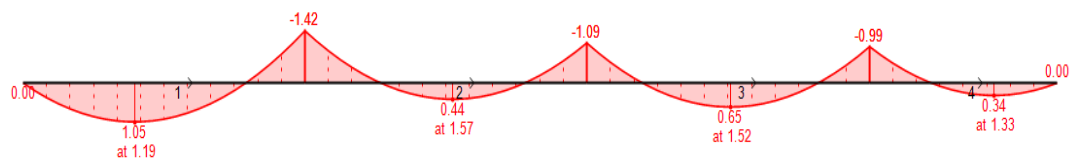


Através de princípios de cálculo estrutural e de equilíbrio estático da viga foi possível obter os seguintes diagramas de esforço transversal e momentos:

VV



MM



A validação verificação segundo o EC5 irá incidir sobre os Estados Limites Últimos e Estados Limites de Utilização.

Dentro dos limites últimos, a análise irá focar nos seguintes aspectos:

1. Flexão simples
2. Instabilidade lateral torsional
3. Corte
4. Compressão perpendicular ao fio
5. Torção

Nos estados limites de utilização serão analisados:

1. Deformação
2. Vibração

A madeira é um material cujas propriedades mecânicas variam em função de determinadas variáveis:

- Temperatura
- Teor de Água
- Humidade do Ar
- Fluência
- Outras

O EC5 define diferentes classes de serviço em função destes parâmetros:

Quadro 5 - Classes de Serviço da Madeira – Condições de Temperatura e Humidade

Classe de Serviço	Temperatura	Humidade
1	20° C +/- 2° C	>65%
2	20° C +/- 2° C	>85%
3	Qualquer outro tipo de condições passíveis de conduzir a um teor de humidade superior	

O EC5 inclui também um parâmetro de redução da resistência da madeira em virtude do fenómeno de fluência. Este factor de redução – k_{mod} , está directamente correlacionado com a classe de serviço da madeira descrita anteriormente e também com o tipo de acções a que o material se encontra sujeito. Assim o valor de cálculo de qualquer propriedade da madeira vem afectado deste factor – $X_d = k_{mod} \times X_k / \gamma_M$

A tabela seguinte contém valores de k_{mod} associados a vigas de madeira maciça de secção rectangular:

Quadro 6 – Classes de Serviço da Madeira – Tipo de Acções

Classe de Serviço	Classe de Duração				
	Permanentes	Longa Duração	Média Duração	Curta Duração	Instantânea
1	0.6	0.7	0.8	0.9	1.1
2	0.6	0.7	0.8	0.9	1.1
3	0.5	0.55	0.8	0.7	0.9

Importa também caracterizar os diversos tipos de madeira mais utilizados em sistemas estruturais. A madeira mais comum no Norte de Portugal é o pinho bravo, a qual pertence à classe C18 para efeitos de cálculo e verificação de tensões. Importa também referir que várias fontes situam a massa volúmica desta espécie de madeira na ordem dos 600 kg/m³.

Quadro 7 – Propriedades das Várias Classes de Madeira

		Poplar and softwood species												Hardwood species					
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Strength properties (in N/mm ²)																			
Bending	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	30	35	40	50	60	70
Tension parallel	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	18	21	24	30	36	42
Tension perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compression parallel	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	23	25	26	29	32	34
Compression perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Shear	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Stiffness properties (in kN/mm ²)																			
Mean modulus of elasticity parallel	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16	10	10	11	14	17	20
5% modulus of elasticity parallel	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
Mean modulus of elasticity perpendicular	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
Mean shear modulus	G_{mean}	0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25

O EC5 prevê também que as resistências de cálculo da madeira sejam afectadas de um factor de incremento de forma a contabilizar os efeitos de distribuição de carga pelos elementos adjacentes, sempre que haja ligação através de estruturas suplementares como tarugos ou soalho. Este factor é designado por K_{sys} e segundo as recomendações do EC5 deve assumir um valor igual a 1.1

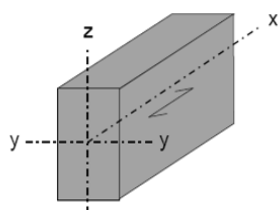
Um último factor a considerar no cálculo é o que permite considerar um aumento da tensão característica do material caso a altura da secção seja inferior a 150 mm. O factor k_h a ser multiplicado pela tensão característica será o mínimo de:

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{150}{h} \right)^{0.2}, 1.3 \right\}$$

Em que h é a altura da secção de cálculo em mm.

Características do sistema a analisar – Parâmetros de entrada

Eixos:



Quadro 8 – Dados de Entrada Para Verificação ao EC5

Secção das Vigas – b x h	0.1 x 0.12 m ²
I _y	1.44E-5 m ⁴
γM	1.3
f _{m,k}	18E6 Pa
E _{0.05}	6E9 Pa
G	0.56E9 Pa
L _(max)	2.7m

5.1.2.1. VERIFICAÇÃO À FLEXÃO

$$\sigma_{md} \leq f_{m,d}$$

$$\sigma_{md} = \frac{M_{y,sd}}{I_y} z = \frac{1.42}{1.44E-4} 0.06 = 5.8 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} = k_{sys} \times k_h \times k_{mod} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 1.1 \times 1.05 \times 0.6 \times 18 / 1.3 = 9.5 \text{ MPa}$$

A secção verifica assim a resistência à flexão.

5.1.2.2. VERIFICAÇÃO AO CORTE

$$\tau_{sd} \leq f_{v,d}$$

$$\tau_{sd} = \frac{1.5V_{sd}}{bh} = \frac{1.5 \times 2.7}{0.012} = 0.34 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = 2 \text{ MPa}$$

A secção verifica as tensões de corte.

5.1.2.3. VERIFICAÇÃO AO CORTE NO PLANO PERPENDICULAR AO FIO

A verificação à tensão no plano perpendicular ao fio não se justifica neste caso dado que a viga se encontra sujeita a esforços desprezáveis neste plano.

A verificação, se efectuada, consistiria em simplesmente comparar as tensões de cálculo no plano perpendicular com as tensões características no mesmo plano, afectadas de um coeficiente de forma, como descrito no EC5:

$$\sigma_{c,90} \leq K_{c,90} \times f_{c,90d}$$

5.1.2.4. VERIFICAÇÃO À TORÇÃO

As vigas em análise não se encontram sujeitas a esforços de torção pelo que apenas se fará referência à forma como o EC5 aborda o tema.

Esta verificação baseia-se no princípio de que:

$$\tau_{tor,d} \leq k_{shape} \times f_{v,d}$$

Em que para vigas rectangulares:

$$k_{shape} = \min \begin{cases} 2.0 \\ 1 + 0.15 \frac{h}{b} \end{cases}$$

e

$$\tau_{tor,d} = \frac{M_t}{\alpha \cdot h \cdot b^2}$$

Em que α é um coeficiente de forma que toma em linha de conta o rácio entre a altura e a largura da viga.

5.1.2.5. VERIFICAÇÃO À INSTABILIDADE LATERAL TORSIONAL

A verificação fundamental a realizar neste caso é:

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,d}$$

O cálculo de k_{crit} inclui a determinação de um conjunto de factores, entre os quais a tensão crítica passível de gerar instabilidade lateral nos elementos estruturais, assim como um coeficiente de esbelteza.

Este é um fenómeno com pouca preponderância em estruturas de madeira que possuem sistemas de tarugamento, como é o caso da presente estrutura em que serão introduzidos tarugos de secção igual às vigas, irão ser instalados a meio vão. A figura seguinte mostra um plano em que é possível visualizar todos os tarugos a serem instalados, assinalados a azul e marcados com a letra t:

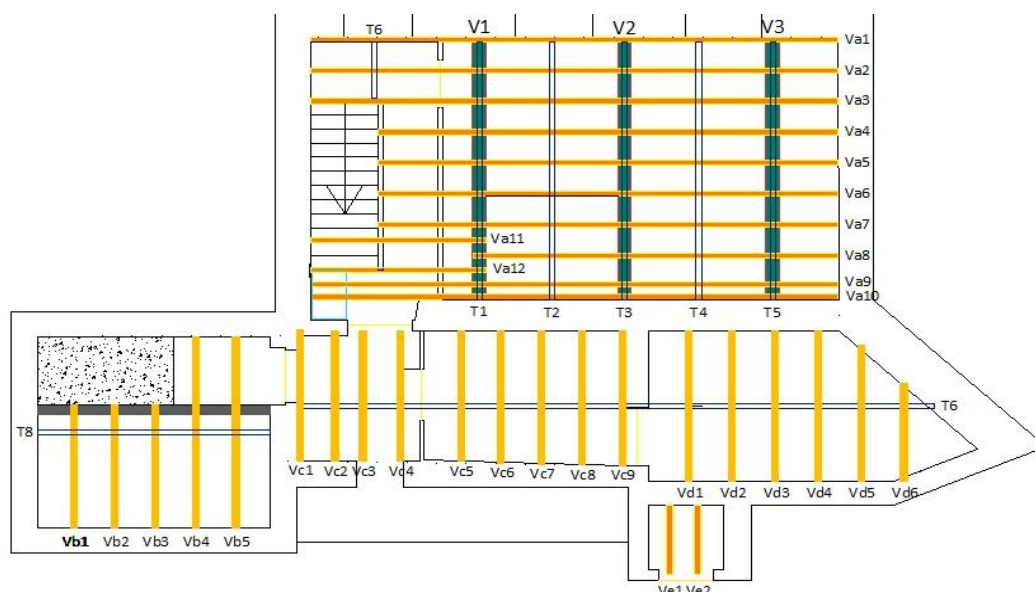


Figura 37 – Esquema de Tarugamento a Instalar

Os fenómenos de encurvadura fora do plano de actuação do momento flector ocorrem quando a tensão nas fibras atinge um patamar crítico que pode ser calculado da seguinte forma para madeiras leves:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0.78b^2}{h \cdot l_{ef}} E_{0.05}$$

Onde l_{ef} é o comprimento efectivo da viga, tendo em conta as suas condições de suporte e de carga. A tabela 6.1 do EC5 impõe os seguintes coeficientes:

Quadro 9 – Vão efectivo a considerar – EC5

Tipo de Viga	Tipo de Carga	l_{ef}/l
Simplesmente Apoiada	Momento constante	1.0
	Carga uniformemente distribuída	0.9
	Força concentrada a meio vão	0.8
Encastrada numa extremidade	Carga uniformemente distribuída	0.5
	Carga concentrada na extremidade livre	0.8

$l_{ef} = 0.9 l = 0.9 \times 2.7 = 2.43$, o que substituindo na expressão acima vem:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0.78 \cdot 0.1^2}{0.13 \cdot 2.4} \cdot 6E3 = 150 \text{ MPa}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{18}{150}} = 0.34$$

Os valores de k_{crit} podem ser obtidos a partir da expressão 6.34 do EC5:

Quadro 10 – Coeficiente de Tensão Crítica de Encurvadura

λ	K_{crit}
≤ 0.75	1
$0.75 \leq \lambda \leq 1.4$	$1.56 - 0.75 \lambda$
> 1.4	$1/\lambda^2$

Com base nos valores calculados o valor de k_{crit} será igual à unidade, o que em termos de verificação à tensão crítica de instabilidade lateral resulta que:

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,d}$$

O que já foi anteriormente verificado e demonstra que a secção possui estabilidade ao encurvamento lateral.

5.1.2.6. CONTROLO DE DEFORMAÇÕES - ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

O EC5 preconiza que o controlo de deformações seja efectuado tendo em conta o valor das cargas permanentes e o valor das sobrecargas:

w_{inst} – deformação devida a cargas variáveis

w_{creep} – deformação devida a cargas permanentes

w_c – contra-flecha

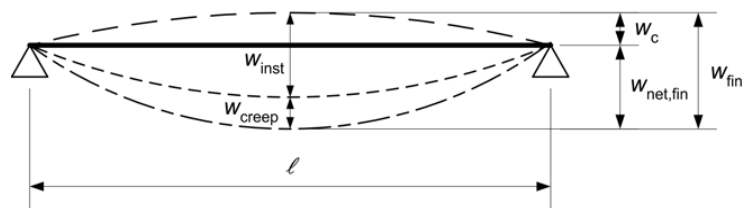


Figura 38 – Deformações em Viga Simplesmente Apoiada Segundo o EC5

Sendo que o valor final da deformação é calculado da seguinte forma:

$$w_{net,fin} = w_{inst} + w_{creep} - w_c = w_{fin} - w_c$$

Para vigas simplesmente apoiadas o valor da deformação é calculado da seguinte forma:

$$w = \frac{5}{384} \frac{q L^4}{EI} \left[1 + \frac{24}{25} \times \frac{E}{G} \times \left(\left(\frac{h}{L} \right)^2 \right) \right]$$

Quadro 11 – Coeficiente de Tensão Crítica de Encurvadura

Tipo de Carga	Quantificação da carga (kN/m)	Deformação w
g – permanente	0.4	$w_{\text{creep}} = 3.3\text{E-}6$
q – variável	1.1	$w_{\text{inst}} = 9\text{E-}6$

Com base nos valores calculados é possível obter que $w_{\text{net,fin}} = 1.2\text{E-}5$ ou 0.012 mm.

O EC5 impõe as seguintes restrições em termos de deformação:

Quadro 12 – Comparação Entre Deformações Regulamentares e de Cálculo

Deformações	w_{inst}	$w_{\text{net,fin}}$	w_{fin}
Regulamentar (mm)	$1/500 < w_{\text{inst}} < 1/300$	$1/350 < w_{\text{net,fin}} < 1/250$	$1/300 < w_{\text{fin}} < 1/150$
	$5.4 < w_{\text{inst}} < 9$	$7.7 < w_{\text{net,fin}} < 11$	$9 < w_{\text{fin}} < 18$
Cálculo (mm)	0.009	0.012	0.012

O controlo de deformações tem por objectivo minimizar eventuais danos em elementos não estruturais como paredes divisórias de tabique, ou evitar que elementos acoplados à estrutura como canalizações sejam afectados por deformações excessivas que afectem o seu funcionamento.

5.1.2.7. CONTROLO DE VIBRAÇÕES – ESTADO LIMITE DE UTILIZAÇÃO

O EC5 estabelece que no caso da frequência fundamental de um pavimento de madeira ser inferior a 8 Hz, então este deve ser alvo de um estudo pormenorizado. Caso contrário, para frequências superiores a 8 Hz, frequências tipicamente superiores às geradas pelo caminhar humano, o pavimento deve verificar as seguintes condições:

$$v \leq b^{(f/1 \zeta - 1)}$$

Em que v é o valor máximo inicial da velocidade de vibração do pavimento, quando estimulado por um impulso equivalente a (1 Ns), aplicado no ponto do pavimento capaz de produzir resposta máxima.

b é calculado a partir do gráfico 7.2 do EC5:

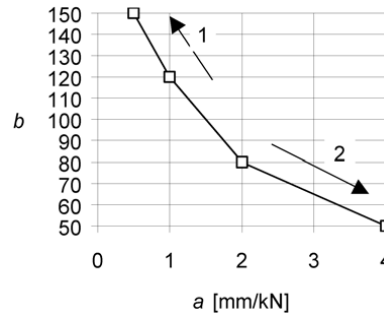


Figura 39 – Determinação do factor “b” segundo o EC5, consoante o tipo de pavimento

Em que a tendência 1 é característica de um pavimento com bom desempenho enquanto que a gama de valores associados com a tendência 2 está tipicamente relacionada com pavimentos de baixo desempenho. No cálculo deste pavimento irá ser considerado um valor intermédio – 100.

ζ é o coeficiente modal de amortecimento do pavimento, um factor que varia mais significativamente com as condições de apoio. O EC5 define que o valor a adoptar para este parâmetro deverá ser 0.01, no caso de não se encontrarem disponíveis valores mais específicos relacionados directamente com a estrutura em estudo.

f_1 é a frequência fundamental do pavimento e é calculada da seguinte forma:

$$f_1 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{(EI)_{long}}{m}}$$

m – massa do pavimento por unidade de área

l – vão do piso

EI_{long} – rigidez do pavimento do piso na direcção do eixo perpendicular à direcção das vigas (N/mm²)

Por sua vez, a velocidade de vibração v deve ser calculada da seguinte forma:

$$v = \frac{4(0.4 + 0.6 n_{40})}{m b l + 200}$$

em que n_{40} é o número de modos de primeira ordem com frequências naturais até 40 Hz. Por sua vez n_{40} deve ser calculado da seguinte forma:

$$n_{40} = \left\{ \left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \left(\frac{b}{l} \right)^4 \frac{EI_l}{EI_b} \right\}^{0.25}$$

As frequências fundamentais calculadas para este tipo de pavimento são baixas, pelo que a metodologia descrita no EC5 não é adequada para este tipo de verificação. O facto do pavimento possuir uma espessura de soalho considerável, aliado a um tarugamento simples poderão ser factores que influirão no desempenho favorável do pavimento no capítulo das vibrações.

5.1.3. MONTAGEM DE VIGAS METÁLICAS PARALELAS AO VIGAMENTO SECUNDÁRIO – VERIFICAÇÃO SEGUNDO O EC3

O dimensionamento das vigas metálicas que passarão a suportar o soalho será realizada de acordo com o Eurocódigo 3 – Estruturas de Aço.

De forma a reduzir o impacto no sistema estrutural do edifício e de forma a replicar o mais possível a estrutura existente, os perfis metálicos a dimensionar/verificar segundo o EC3 terão uma altura de 220mm, o que permitirá posicioná-los ao mesmo nível do vigamento existente.

Quadro 13 - Acções a considerar – Combinações e quadro de entrada

Elemento	Carga (KN/m)	Tipo	Nota de quantificação
Soalho	1.44	Permanente	$e=6\text{cm}$; $\gamma M=600\text{kg/m}^3$; Largura de Influência = 4m
Vigas de Madeira Secundárias	0.4	Permanente	$A=0.1*0.12\text{m}^2$; $l=10\text{m}$; $\gamma M=600\text{kg/m}^3$; 10 vigas; 7.8kN Largura de Influência = 4m
Tarugos de Madeira	0.18	Permanente	$A=0.1*0.1\text{m}^2$; $\gamma M=600\text{kg/m}^3$; Largura de Influência cada viga absorve cargas de 3 tarugos
Viga Metálica em perfil HEB 200	0.72	Permanente – peso próprio	
Sobrecarga 1	8	Sobrecarga	RSA (geral – habitação) $q = 2 \text{ kN/m}^2$; Largura de Influência = 4m
Sobrecarga 2	5.8	Sobrecarga	RSA (paredes divisórias) $\gamma_{\text{tabique}}=1.3\text{KN/m}^3$; $h_{\text{tabique}}=2.6\text{m}$; $q=0.4\text{g}$; Largura de Influência = 4m

Quadro 14 - Combinações de Acções

Estados Limites Últimos	Acções Variáveis	$\gamma_q = 1.5$
	Acções Permanentes Desfavoráveis	$\gamma_g = 1.5$
	Acções Permanentes Passíveis de Determinação Rigorosa	$\gamma_g = 1.35$
	Acções Permanentes Favoráveis	$\gamma_g = 1.0$
Estados Limites de Utilização		$\gamma_g = 1.0$

Quadro 15 - Coeficientes de Redução de Acções Variáveis

Tipo de Utilização	ψ_0	ψ_1	ψ_2
a) Edifício de habitação para uso de carácter privado	0.4	0.3	0.2

Quantificação da carga distribuída actuante (p) actuante na viga

$$p = \gamma_g \sum_{i=0}^i G_i + \gamma_q \sum_{i=0}^i (\psi_0 \times Q_i)$$

$$= 1.35 \cdot (1.44 + 0.6 + 0.18 + 0.72) + 1.5 \cdot (0.4 \cdot (8 + 5.8))$$

$$= 12.3 \text{ kN/m}$$

$$M_{sd,max} = \frac{pl^2}{8} = \frac{12.3 \cdot 6^2}{8} = 55.4 \text{ kNm}$$

$$V_{sd,max} = \frac{pl}{2} = \frac{12.3 \cdot 6}{2} = 37 \text{ kN}$$

A quantificação das cargas de cálculo incluiu os seguintes parâmetros:

G_k – Acções Permanentes – Peso do soalho, vigamento secundário, tarugos e peso próprio da viga metálica

Q_k – Acções Variáveis – Sobrecarga Para Edifícios de Habitação e sobrecarga de paredes divisórias

Todas as vigas a instalar ficarão simplesmente apoiadas nas paredes de alvenaria de granito de Norte e de Sul, o que resulta num vão total de 6m.

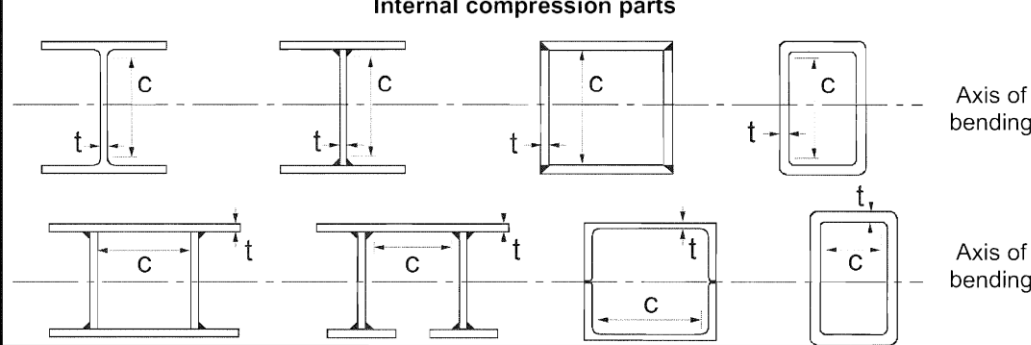
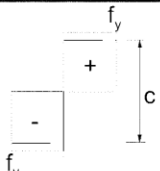
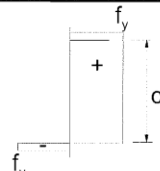
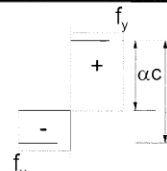
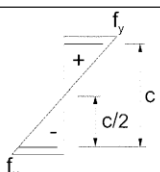
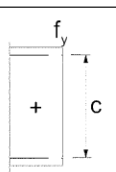
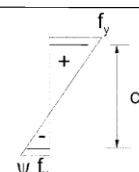
5.1.3.1. DEFINIÇÃO DA CLASSE DE SERVIÇO DO AÇO

Tensão Característica $f_y = 235 \text{ Mpa}$

De acordo com a tabela 5.2 do EC 3 isto traduz-se num factor de cálculo de secção $\varepsilon = 1.0$

De forma a definir a classe de funcionamento do aço há que considerar a geometria e esbelteza da secção de forma a antecipar o seu comportamento. Perfis demasiado esbeltos tendem a encurvar no plano perpendicular ao de carga, ou fora do plano de carga, ainda antes de atingirem o limite de carga resistente da secção. Importa por isso classificar o perfil em estudo em função da sua geometria de forma a garantir que o dimensionamento é realizado de forma adequada.

Quadro 16 - Classe de Serviço do Aço em Função de Rácios Geométricos do Perfil

Internal compression parts						
				Axis of bending		
Class	Part subject to bending	Part subject to compression	Part subject to bending and compression			
Stress distribution in parts (compression positive)						
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	when $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ when $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	when $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ when $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
Stress distribution in parts (compression positive)						
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	when $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ when $\psi \leq -1^{*)}$: $c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

*) $\psi \leq -1$ applies where either the compression stress $\sigma \leq f_y$ or the tensile strain $\varepsilon_y > f_y/E$

Para uma secção HEB 220 há que considerar os seguintes parâmetros:

$t_w = 9.5\text{mm}$ – Espessura da Alma

$t_f = 16\text{ mm}$ – Espessura das Abas

$r = 18\text{ mm}$

Abas/flange

$$c = (b - t_w - 2 \times r) / 2 = (220 - 9.5 - 2 \times 18) / 2 = 87.25$$

$$c/t_f = 87.25 / 16 = 5.4$$

Alma/web

$$c = (h - 2 \times t_f - 2 \times r) / 2 = (220 - 2 \times 16 - 2 \times 18) / 2 = 76$$

$$c / t_w = 76 / 9.5 = 8$$

E que resulta nos seguintes rácios:

$$c / t_f = 5.4 < 10 \times \varepsilon = 10 \Rightarrow \text{Classe 1}$$

$$d / t_w = 8 < 72 \times \varepsilon = 72 \Rightarrow \text{Classe 1}$$

Logo o perfil é de classe 1.

5.1.3.2. VERIFICAÇÃO À FLEXÃO

Da equação 6.12 do EC3 vem que:

$M_{Ed} < M_{c,Rd}$, ou seja o momento de cálculo deverá ser inferior ou momento resistente da secção em estudo. O cálculo do momento resistente vem então que:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = W_{pl} \times f_y / \gamma_{MO} = 736 \times 10^{-6} \times 235 \times 10^3 / 1.0 = 173 \text{ kN.m}$$

Logo, $M_{Ed} < M_{c,Rd}$, ou seja $55.4 \text{ kN.m} < 173 \text{ kN.m}$, e o perfil preenche claramente os requisitos necessários para resistir a solicitações de flexão.

Em alternativa,

Como $M_{sd} = 55.4 \text{ kN.m}$

Então,

$$M_{c,Rd} > 55.4 \Rightarrow W_{pl} \times f_y / \gamma_{MO} > 55.4 \Rightarrow W_{pl} > 55.4 / 235 \times 10^3$$

$$W_{pl} > 236 \text{ cm}^3$$

Dentro da gama HEB, o perfil HEB160 é o que preenche os requisitos mínimos.

5.1.3.3. VERIFICAÇÃO AO CORTE

$$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\sqrt{3} \gamma_{MO}}$$

Cálculo da área de corte A_v :

$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$$

$$A_v = 9100 - 2 \times 220 \times 16 + (9.5 + 2 \times 18) \times 16 = 2788 \text{ mm}^2$$

$$\text{Logo, } V_{pl,Rd} = (A_v \times f_y \times 3^{-0.5}) / \gamma_{MO} = 2788 \times 10^{-3} \times 235 \times 3^{-0.5} / 1.0 = 378.3 \text{ kN}$$

$$\text{Logo } V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}, \text{ ou seja } 37 \leq 378.3 \text{ kN}$$

Em alternativa,

$$\text{Como } V_{sd} = 37 \text{ kN}$$

$$\text{Vem que } V_{pl,Rd} > 37 \text{ kN}$$

$$A_v \times f_y / \sqrt{3} > 37 \Rightarrow$$

$$A_v > 37 \times \sqrt{3} / 235 \times 10^3$$

$$A_v > 2,72 \text{ cm}^2$$

Como se verifica por este cálculo, o esforço não é o factor condicionante deste dimensionamento, pelo que mesmo o perfil de entrada da série HEB verificaria os requisitos do dimensionamento ao corte.

5.1.3.4. CONTROLO DA DEFORMAÇÃO A MEIO VÃO – ESTADO LIMITE DE UTILIZAÇÃO

A flecha máxima admissível calcula-se com base em valores limites recomendados para os deslocamentos verticais em

$$d_{\max} = d1 + d2 - d0$$

d_{\max} - flecha no estado final

$d1$ - variação da flecha da viga devida às acções permanentes

$d2$ - variação da flecha da viga devida aos valores reduzidos das acções variáveis utilizados nas combinações características:

$d0$ - contra-flecha

Segundo a NP EN 1993-1-1 2008 a flecha máxima não pode exceder $l/250$ de forma a que não se produzam danos em revestimentos ou divisórias flexíveis.

$$\text{Com } l = 250 \text{ vem que } d_{\max} = 6 / 250 = 2.4 \text{ cm}$$

$$d = \frac{5pL}{384(EI)}$$

Quantificação da carga distribuída actuante (p) na viga em estados limites de utilização:

$$p = \gamma_g \sum_{i=0}^i G_i + \gamma_q \sum_{i=0}^i (\psi_k \times Q_i)$$

$$= 1.35 \cdot (1.44 + 0.6 + 0.18 + 0.72) + 1.5 \cdot (0.3 \cdot 8 + 0.2 \cdot 5.8)$$

$$= 9.3 \text{ kN/m}$$

$$d = \frac{5 \cdot 9300 \cdot 6}{384(210E9 \cdot 8091E-8)} = 0.04 \text{ mm}$$

Ou,

$$0.024 > \frac{5 \cdot 9300 \cdot 6}{384(210E9 \cdot I)} \Rightarrow$$

$$I > 14.4 \text{ cm}^4$$

Logo o perfil HEB 220 com uma inércia claramente superior a este valor garante que a flecha a meio vão será claramente inferior aos limites especificados pelo EC3

5.1.3.5. VERIFICAÇÃO À ENCURVADURA EM PLANO TRANSVERSAL AO DE APLICAÇÃO DE CARGAS

O EC3 define no ponto 6.3.2.1 que:

$$M_{Ed} < M_{B,Rd}$$

Em que M_{Ed} representa o valor do momento flector de cálculo na secção segundo o eixo em estudo e $M_{B,Rd}$ é o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura da secção. Para o momento resistente vem que:

$$M_{B,Rd} = \chi_{LT} \times W_{pl,y} \times \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

Em que, dependendo da classe da secção, o momento estático segundo o eixo forte assume os seguintes valores

$W_y = W_{pl,y}$ para Secções das classes 1 e 2

$W_y = W_{el,y}$ para secções da classe 3

$W_y = W_{eff,y}$ para secções da classe 4

χ_{LT} é o factor de redução para encurvadura latero-torsional

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \left(\phi_{LT}^2 + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right)^{0.5}} \leq 1$$

onde

$$\phi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} \left(\bar{\lambda}_{LT}^2 + 0.2 \right) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

os valores de α_{LT} (factor de imperfeição) são dados em função da curva de encurvadura da secção:

Quadro 17 – Factor de Imperfeição em função da curva de encurvadura do perfil

Buckling curve	a	b	c	d
Imperfection factor α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Quadro 18 – Definição de curvas de encurvadura tipo para perfis laminados e soldados

Cross-section	Limits	Buckling curve
Rolled I-sections	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Welded I-sections	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Other cross-sections	-	d

As secções laminadas incluem as curvas tipo a e b, enquanto as secções soldadas incluem curvas tipo c e d.

Para secções laminadas o valor de cálculo normalmente adoptado é 0.21. $\bar{\lambda}_{LT}$ é o valor da esbelteza normalizada:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \left(\frac{\beta_w \cdot W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}} \right)^{0.5} = \left(\frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \right) [\beta_w]^{0.5}$$

e em que:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \left(\frac{E}{f_y} \right)^{0.5} \quad \text{e,}$$

$\beta_w = 1$, para secções transversais de Classe 1 ou 2

$\beta_w = W_{el,y} / W_{pl,y}$, para secções transversais de Classe 3

$\beta_w = W_{eff,y} / W_{pl,y}$, para secções transversais de Classe 4

Já M_{cr} é calculado da seguinte forma:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(kl)^2} \left[\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kl)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} \right]^{0.5}$$

Em que O valor de C_1 são retirados da tabela F.1.2 mediante as condições de apoio da viga, de carregamento e valores de comprimento efectivo.

L – Comprimento de encurvadura;

K – Factor de comprimento efectivo;

k – Factor de forma;

k_{LT} – Factor de forma normalizado;

C_1 – Coeficiente de flexão

Em que C_1 é calculado da seguinte forma:

$$C_1 = 1.88 - 1.40\psi + 0.52\psi^2 \leq 2.70$$

ψ representa o rácio entre os momentos mínimos e máximo, o que neste caso se traduz em:

$\psi = 0$ uma vez que as vigas se encontram simplesmente apoiadas.

O que resulta em $C_1 = 1.88$

Substituindo todos os valores vem que:

$$M_{B,Rd} = \chi_{LT} \times W_{pl,y} \times \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$= 0.62 \times 736 \times 10^6 \times \frac{235}{1.05}$$

$$= 107.2 \text{ kN.m} > 55.4 \text{ kN.m}$$

Logo o perfil HEB 220 verifica e possui também capacidade para suportar o máximo momento flector expectável sem que ocorra qualquer tipo de fenómeno de instabilidade lateral.

5.1.4. DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE VIGAS EM MADEIRA LAMELADA DE PINHO NÓRDICO

Um dos materiais mais avançados presentemente disponível no mercado Português é a madeira lamelada de pinho nórdico – um material de elevado desempenho, extremamente leve, com excelentes propriedades mecânicas e baixos níveis de deformação volumétrica.

As vigas de madeira lamelada são formadas por lâminas de madeira coladas entre si e que permitem que o corte das peças seja adaptado às necessidades de cada projecto ainda em fábrica.

Uma vez em obra, o sistema é de fácil montagem, dada a leveza das partes e o facto de ser um sistema de montagem completamente a seco:



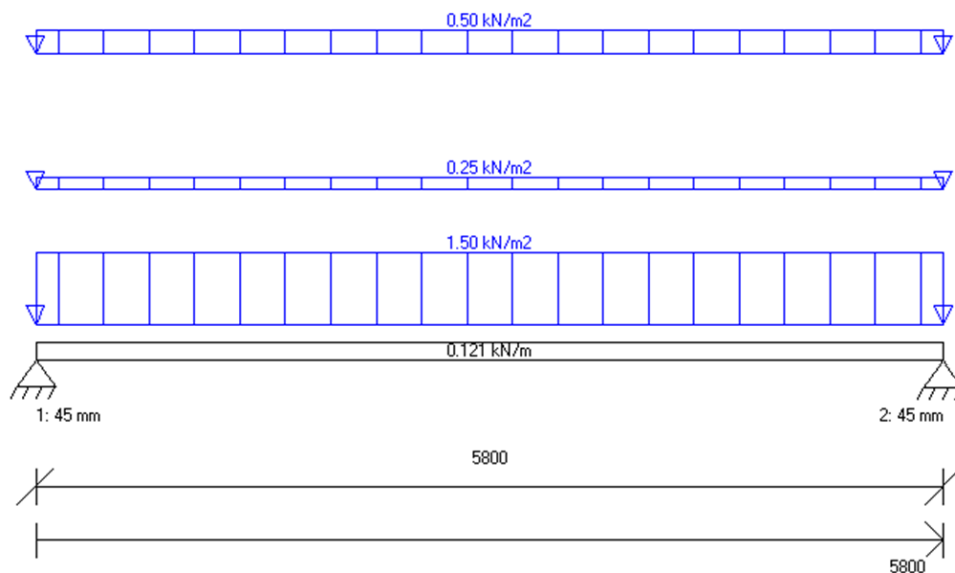
Figura 40 – Sistema de Vigas em Pinho Nórdico – Montagem



Figura 41 – Sistema de Vigas em Pinho Nórdico – Aspecto Final

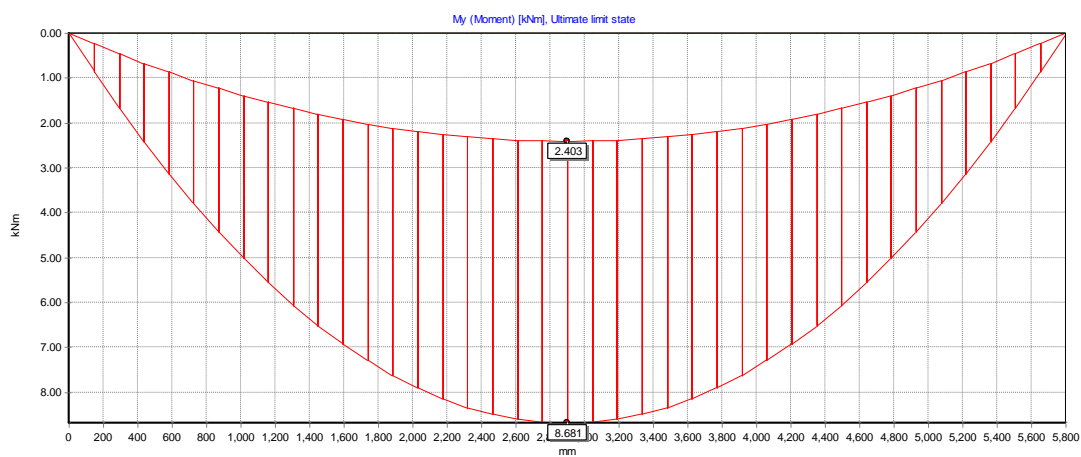
Recorrendo a um software do fornecedor é possível dimensionar pelo EC5 o pavimento a instalar na zona 1 do edifício (Vão = 5.8m)

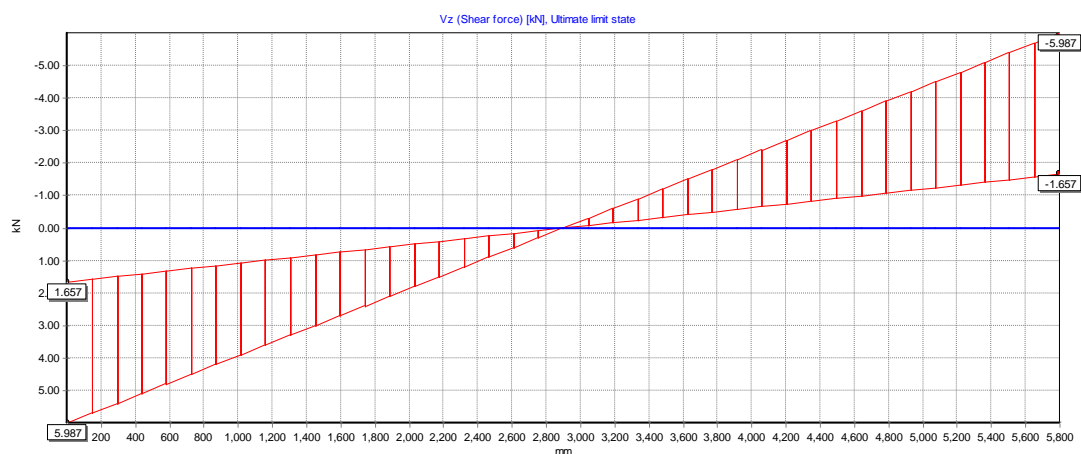
Utilizando as cargas previamente calculadas vem que:



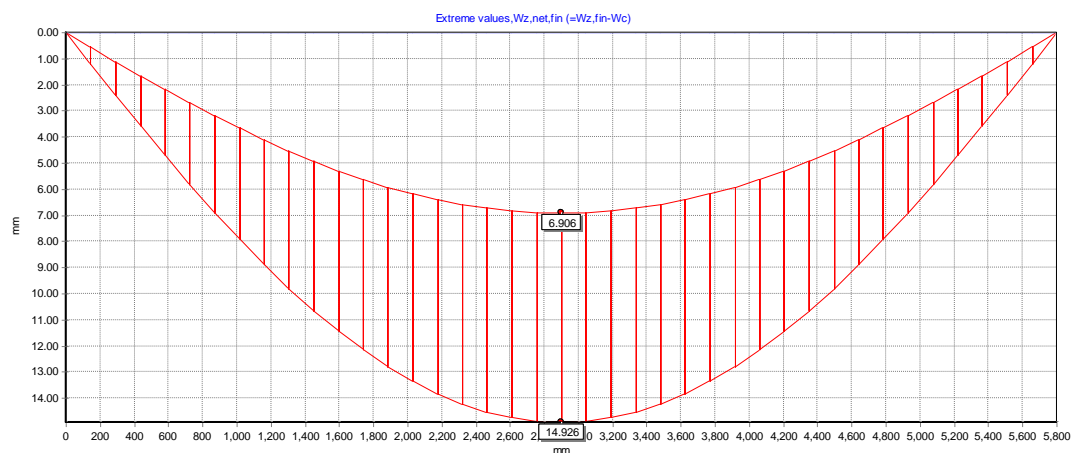
O que produz os seguintes resultados:

My



V_z

Deformações



Assim, para as cargas a que o pavimento se encontra sujeito, é possível obter resultados detalhados para o tipo de viga a utilizar, espaçamento, frequências de vibração, níveis de solicitação do material, entre outros:

Elemento:	Viga de Madeira
Secção transversal:	90*270 (B=90 mm, H=270 mm)
Classe de Serviço (EC5):	1
Espaçamento entre vigas:	600 mm

Vão 1 5800.0 mm

Apoios	Coordenadas x [mm]:	Comprimento Apoio [mm]:	Tipo:
1:	0	45	Apoio Duplo (X,Z)
2:	5800	45	Apoio Duplo (X,Z)

f _{m,k} (M _y):	34.66 N/mm ²
f _{m,k} (M _z):	32.00 N/mm ²
f _{c,0,k} :	26.50 N/mm ²
f _{c,90,k} :	3.00 N/mm ²

$f_{t,0,k}$:	21.12 N/mm ²
$f_{v,k}$ (V _z):	3.20 N/mm ²
$f_{v,k}$ (V _y):	3.20 N/mm ²
E(média):	13700 N/mm ²
G(média):	780 N/mm ²
E 0.05:	11100 N/mm ²
G 0.05:	630 N/mm ²

Factor de forma:	1.25
Factor de carga:	k_{mod} :
Permanente:	0.600
Longo-prazo:	0.700
Médio-prazo:	0.800
Curto-prazo:	0.900
Instantaneous:	1.100

k_{def} :	0.600
-------------	-------

Cargas:

Peso próprio (Permanente):		
Peso próprio do elemento:	$QZ = 0.121 \text{ kN/m}$	$x = 0 - 5800 \text{ mm}$
Carga uniformemente distribuída 1:	$QZ = 0.500 \text{ kN/m}^2$	$x = 0 - 5800 \text{ mm}$
Peso de paredes divisórias (Permanente):		
Carga uniformemente distribuída 1:	$QZ = 0.250 \text{ kN/m}^2$	$x = 0 - 5800 \text{ mm}$
Sobrecarga (Edifício Residencial):		
Carga Uniformemente Distribuída: 1:	$QZ = 1.500 \text{ kN/m}^2$	$x = 0 - 5800 \text{ mm}$

Combinações de Cargas:

Combinação 1 (ELU)

$1.35 \cdot \text{Peso-próprio} + 1.35 \cdot \text{Paredes Divisórias}$

Combinação 2 (ELU)

$1.35 \cdot \text{Peso-próprio} + 1.35 \cdot \text{Paredes Divisórias} + 1.50 \cdot 0.70 \cdot \text{Sobrecarga}$

Combinação 6 (ELU)

$1.00 \cdot \text{Peso-próprio} + 1.00 \cdot \text{Paredes Divisórias} + 1.50 \cdot 0.70 \cdot \text{Sobrecarga}$

Combinação 8 (ELU)

$1.25 \cdot \text{Peso-próprio} + 1.25 \cdot \text{Paredes Divisórias} + 1.50 \cdot \text{Sobrecarga}$

Combinação 10 (ELU)

$1.25 \cdot \text{Peso-próprio} + 1.25 \cdot \text{Paredes Divisórias} + 1.50 \cdot 0.70 \cdot \text{Sobrecarga}$

Combinação 16 (ELU)

$1.25 \cdot \text{Peso-próprio} + 1.25 \cdot \text{Paredes Divisórias}$

Combinação 17 (ELU)

$1.00 \cdot \text{Peso-próprio} + 1.00 \cdot \text{Paredes Divisórias}$

Combinação 18 (ELU)

$1.00 \cdot \text{Peso-próprio} + 1.00 \cdot \text{Paredes Divisórias} + 1.50 \cdot \text{Sobrecarga}$

 Combinação 27 (ELS)

1.00*Peso-próprio + 1.00*Paredes Divisórias

 Combinação 28 (ELS)

1.00*Peso-próprio + 1.00*Paredes Divisórias + 1.00*Sobrecarga

 Combinação 30 (ELS)

1.00*Peso-próprio + 1.00*Paredes Divisórias + 1.00*0.70*Sobrecarga

=====

Resultados:

Normas: BS EN 1995-1-1:2004+A1:2008 and UK National Annex

Rácio Global Valor Projecto / Valor Resistente (sd/rd): 92.6 %

Dados de Referência para Estados Limites de Utilização:

Valor limite para flecha $W_{net,fin}$: L/250

Valor limite para flecha W_{inst} : L/333 e 12.00 mm

Estados Limites de utilização foram adaptados às características do material e podem diferir da BS EN 1995-1-1:2004+A1:2008

Comprimento de Encurvadura segundo eixo z: $L_c = 1.00*L$

Comprimento de Encurvadura segundo eixo y: $L_c = 1.00*L$

Vibrações:

Frequência Mínima de Referência [Hz]: 8

Flecha máxima para carga de 1 kN: De acordo com Norma do UK para o EC5

Massa do pavimento para cálculos de frequências [kg/m²]: 70

Rigidez transversal da estrutura de pavimento [Nm²/m]: 1908

Módulo de Amortecimento: 0.02

Resultados do Dimensionamento (Valores Extremos):

Elemento/Esforço:	Valor Projecto:	Resistência:	% uso:	Posição xx:
-------------------	-----------------	--------------	--------	-------------

Corte (z):	5.38 kN	22.23 kN	24.2 %	5508 mm
------------	---------	----------	--------	---------

Flexão (My):	8.68 kNm	24.26 kNm	35.8 %	2900 mm
--------------	----------	-----------	--------	---------

(sem kcrit):	8.68 kNm	24.26 kNm	35.8 %	2900 mm
--------------	----------	-----------	--------	---------

Apoio 1:	5.99 kN	19.44 kN	30.8 %	0 mm
----------	---------	----------	--------	------

Factor de carga = 2.50 (=kc90*Lef/Lsupport)

Apoio 2:	5.99 kN	19.44 kN	30.8 %	5800 mm
----------	---------	----------	--------	---------

Factor de carga = 2.50 (=kc90*Lef/Lsupport)

Vão 1, W_{inst} :	11.1 mm	12.0 mm	92.6 %	2900 mm
---------------------	---------	---------	--------	---------

Vão 1, $W_{net,fin}$:	14.9 mm	23.2 mm	64.3 %	2900 mm
------------------------	---------	---------	--------	---------

Flecha meio-vão, w:	1.07 mm	1.20 mm	89.4%	
---------------------	---------	---------	-------	--

Frequência f1:	10.25 Hz	8.00 Hz	78.1%	
----------------	-----------------	---------	-------	--

Velocidade de propagação:		0.0124 m/(Ns ²)	0.0235 m/(Ns ²)	52.9%
---------------------------	--	-----------------------------	-----------------------------	-------

 Combinações de Carga para Estados Limites (ELU/ELS):

1.25*Peso Próprio + 1.25*Peso Paredes Divisórias + 1.50*Sobrecarga

1.00*Peso Próprio + 1.00*Peso Paredes Divisórias + 1.00*Sobrecarga

Forças Máximas:

Esforço:	Valor Máximo:	Posição x:
Vz,max	5.99 kN	5800 mm
My,max	8.68 kNm	2900 mm

=====

Reacções nos Apoios:

Apoio:	ELUmax:	ELUmin:	ELSmax:	ELSmin:
1:	5.99 kN	1.66 kN	4.27 kN	1.66 kN
2:	5.99 kN	1.66 kN	4.27 kN	1.66 kN

=====

Notas de Dimensionamento do Software:

-
- Dimensionamento de acordo com norma britânica BS EN 1995-1-1:2004+A1:2008 e UK National Annex(Oct 2009);
 - ELU = Estado Limite Último, ELS = Estado Limite de Serviço ou Utilização
 - Peso-próprio calculado de acordo com norma britânica BS EN 1991-1-1 (Table A.3) ou como o produto da massa volúmica média do material multiplicada pela aceleração da gravidade;
 - Análise de segunda ordem não efectuada;
 - O rácio entre a combinação de acções de projecto e os valores de resistência do material não representa o nível de utilização do material;
 - Verificar necessidade de adicionar contraventamento a meio vão para diminuir vibrações;
 - Deformação gerada por esforços transversos foi considerada no cálculo de estados limites de serviço e estados limites últimos;
 - Redução dos níveis de esforço transversos foi considerada junto aos apoios e foi assumido que as cargas actuam do lado oposto à zona de suporte das vigas;
 - Impacto no cálculo motivado pelas características da secção transversal foi considerado através dos factores de forma k_h e k_l ;
 - Impacto do eventual fissuramento do material foi considerado através do factor k_{cr} , o qual está incluído no valor de corte de cálculo da madeira (f_v, d);
 - Importa assegurar que as peças não irão ser expostas a humidade excessiva;

Embora a frequência do primeiro modo de vibração (ver resultados acima) para o sistema de vigas seleccionado (90 x 270 mm² com espaçamento de 600mm entre vigas) seja na ordem dos 10.25 Hz, o que é uma frequência aceitável, ligeiramente acima do mínimo desejável de 8Hz, é de realçar igualmente que com o sistema dimensionado acima, o material estaria sujeito a um nível elevado de solicitação mecânica, cerca de 92% da sua capacidade resistente o que pode motivar a ocorrência de fenómenos de fluência.

De forma a colmatar esta situação seria recomendável utilizar perfis um nível acima, dentro da mesma gama, ou seja 90 x 315 mm² e espaçamento de 600mm entre vigas, o que produz uma frequência de primeira ordem de vibração $f_1 = 12.56$ Hz e um nível de solicitação do material na ordem dos 64%, o que é bem mais desejável.

Este sistema será apenas equacionado como alternativa, sendo que a solução de base passa por manter a configuração estrutural existente através de reforço e substituição com perfis metálicos, como detalhado nos pontos anteriores.

6

CONCLUSÕES

Embora inicialmente o objectivo fosse manter a estrutura de madeira da laje do primeiro andar na íntegra, os resultados da fase de inspecção e diagnóstico ditaram que o vigamento existente não oferece garantias de funcionamento estrutural adequado, pelo que deverá ser em grande parte substituído. A estratégia global de reabilitação estrutural deste edifício irá assentar nos seguintes princípios:

Zona 1

- Substituição do vigamento inferior de base por perfis metálicos;
- Substituição do vigamento superior por vigas de madeira de secção idêntica;
- Tratamento químico-biológico do soalho existente e aplicação de segundo forro em direcção perpendicular para melhorar rigidez, isolamento e distribuição de cargas – efeito diafragma;
- Instalação de tarugos de contraventamento a meio vão;

Zonas 2 e 3

- Substituição do vigamento existente por vigas de madeira de secção semelhante com reaproveitamento de secções/segmentos da zona 1;
- Tratamento químico-biológico do soalho existente e aplicação de segundo forro em direcção perpendicular;
- Instalação de tarugos de contraventamento a meio vão;

Procurou-se sempre que possível respeitar a identidade do edifício, o que apesar da substituição realçada no ponto anterior se traduziu na retenção do sistema estrutural original, em que as novas vigas se encontram localizadas na mesma posição e transmitem esforços de uma forma similar às paredes de alvenaria existentes, minimizando assim qualquer tipo de redistribuição de esforços que possa ocorrer em fase de construção ou em fase posterior.

Materiais tradicionais como a madeira foram privilegiados em detrimento de soluções construtivas mais pesadas que envolvem o uso de betão armado, um material que conduz a soluções passíveis de afectar negativamente o comportamento estrutural global do edifício.

A coordenação com outras especialidades como térmica, componentes electro-mecânica, e hidráulica é fundamental ainda na fase de projecto. O dimensionamento térmico deverá ter como objectivo manter a temperatura e humidade do edifício dentro de parâmetros aceitáveis para garantir a salubridade do todo e em particular dos elementos de madeira.

As diversas redes do edifício devem ser projectadas em coordenação estreita com a componente arquitetónica de forma a assegurar que a riqueza visual do património antigo não é afectada por um posicionamento e instalação inadequadas.

Em fase de construção é importante assegurar a intervenção de mão-de-obra qualificada e experiente, nomeadamente para os trabalhos de carpintaria e de reparação de tectos em estuque, uma vez que estes elementos são extremamente sensíveis e largamente interligados com a restante estrutura. A eliminação em fase de construção de alguns elementos de suporte pode ditar o colapso de partes mais frágeis do edifício, o que importa como tal prevenir e evitar.

Seria desejável que a reabilitação de edifícios continue a assumir cada vez mais preponderância no mercado de imobiliário em Portugal e como tal interessa garantir o sucesso desta intervenção de forma a que esta possa ser replicada em edifícios similares da região, com o apoio e com a base de conhecimento disponível na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Pavimentos de Madeira em Edifícios Antigos; *Ilharco, Tiago* – 2005 -2007
- [2] Manual de Apoio ao Projecto de Reabilitação de Edifícios Antigos; *Freitas, Vasco Peixoto* – 2012
- [3] Reabilitação de Edifícios Antigos; *Appleton, João* – 2003
- [3] A Sustentabilidade nos Projectos de Reabilitação de Edifícios; *Appleton, João* – 2011
- [4] Projectos Especiais e Dimensionamento Estrutural; *Carriço, Alexandre* – 2003
- [5] Propriedades da Madeira Como Material de Construção; *Lança, Pedro* – 2004
- [6] Projecto de Estruturas Metálicas; *Reis, António* – 2010
- [7] Recuperação de Pavimentos Antigos Em Madeira Com Lajes Mistas Madeira-Betão; *Cardoso, Luís* – 2010